



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## DETEKCE MALÝCH ZMĚN OBJEKTŮ POMOCÍ KAMERY

DETECTION OF SMALL OBJECT MOVEMENTS USING CAMERA

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Bálint Udvardy

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Bálint Udvardy

**ID:** 186217

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Detekce malých změn objektů pomocí kamery

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte aplikaci, která bude schopná detekovat a změřit malé změny polohy objektů ve scéně snímané kamerou.

- 1) Nastudujte metody počítačového vidění pro detekci změn ve snímané scéně.
- 2) Stanovte vhodné metody pro detekci malých změn objektů ve scéně. Zvolte vhodné algoritmy pro zvolené řešení.
- 3) Definujte parametry měřicího systému a vygenerujte několik sad snímků pro testování zvolených algoritmů. Parametry systému budou definovány modelem kamery a snímky budou synteticky generované.
- 4) Realizujte a otestujte zvolené algoritmy. Zhodnoťte dosažené výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P.: Moderní počítačová grafika, Computer Press, 2005, ISBN 978-80-2-1-0454-5

Sonka M., Hlavac V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 3rd Edition, CL Engineering, 2007, ISBN: 978-0495082521

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Jeden ze základních problémů v počítačovém vidění je detekce a analýza pohybu ve snímané scéně. Tato práce je zaměřena na detekci malých změn v obraze pomocí záznějového jevu moaré. Hlavním cílem práce je, pomocí algoritmů používaných v počítačovém vidění detekovat různé typy dislokace. V práci jsou analyzovány synteticky vytvořené snímky pořízeny pomocí matematického modelu pinhole kamery.

## **Klíčová slova**

zvýraznění pohybu, moaré vzory, moaré efekt, sub-pixel, sub-pixelové měření

## **Abstract**

One of the basic problems in computer vision is motion detection and analysis in a given scene. This work focuses on detecting small changes in the image by using the moiré phenomenon. The main goal of this thesis is to detect different types of dislocations with algorithms used in computer vision. In this work synthetically created pictures are analysed, which were created with the mathematical model of a pinhole camera.

## **Keywords**

motion magnification, moiré patterns, moiré effect, sub-pixel, sub-pixel measurement

## **Bibliografická citace**

UDVARDY, Bálint. Detekce malých změn objektů pomocí kamery. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2020. 95s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloslav Richter Ph.D.

## **Prohlášení**

*Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Detekce malých změn objektů pomocí kamery“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

**V Brně dne: 1. června 2020**

.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Miloslavu Richterovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **1. června 2020**

.....

# Obsah

Úvod.....	14
1. Teorie promítání .....	15
1.1 Základní pojmy .....	15
1.2 Proces promítání .....	16
1.3 Perspektivní promítání .....	16
1.4 Pinhole kamera model .....	18
1.4.1 Perspektivní promítání s homogenními souřadnicemi.....	18
1.4.2 Posunutí počátečního bodu .....	19
1.4.3 Intrinzické parametry kamery .....	19
1.4.4 Extrinzické parametry systému.....	20
2. Detekce změn ve scéně .....	22
2.1 Metody pro detekci pohybu .....	22
2.2 Rozdílové metody analýzy pohybu.....	23
2.3 Lokální příznaky a korespondence .....	24
2.3.1 Detektory příznaků .....	24
2.3.2 Nalezení korespondenčních párů .....	26
3. Moaré efekt.....	28
3.1 Superpozice paralelních pruhů.....	29
3.2 Superpozice šikmých pruhů.....	30
3.2.1 S různou periodou vzorů.....	30
3.2.2 Se stejnou periodou.....	34
4. Měřicí systém.....	35

4.1	Model systému .....	35
4.2	Generování obrázků .....	37
5.	Návrh a testování algoritmů .....	40
5.1	Určení periody moaré interferencí z obrazu .....	40
5.1.1	Metoda šířka pruhů .....	43
5.1.2	Metoda založena na rozostření obrázku.....	44
5.2	Určení vzdálenosti vzorů .....	52
5.3	Otočení kolem osy Z.....	56
5.3.1	Metoda postupné otáčení obrázku .....	57
5.3.2	Proložení maxim řádků přímkou .....	59
5.3.3	Určení úhlu z natáčení kostry .....	64
5.3.4	Proložení skeletu přímkou .....	66
5.3.5	Porovnání navržených metod s přímým měřením otáčení.....	68
5.3.6	Měření úhlu natočení vzoru pomocí periody moaré záznejů.....	69
5.4	Náklon v ose X .....	73
5.5	Náklon v ose Y .....	78
6.	Aplikace pro detekci malých pohybů moaré vzorů .....	83
6.1	Grafické uživatelské prostředí .....	83
6.2	Chybová hlášení.....	85
6.3	Stručný návod k použití aplikaci .....	86
	Závěr .....	87
	Literatura.....	88



# Seznam obrázků

Obrázek 1: Objekt a jeho průmět v paralelním promítání (vlevo) a ve středovém promítání (vpravo) .....	15
Obrázek 2: Geometrie pinhole kamery, kde C je střed promítání (kamery) a p je počáteční bod průmětny; případ: průmětna je před kamerou [3].....	17
Obrázek 3: Středové promítání jednobodové (vlevo), dvoubodové (uprostřed) a trojbodové (vpravo) [2].....	18
Obrázek 4: Počátek souřadnicového systému obrazu (u,v) a kamery (x, y) [4] .....	19
Obrázek 5: Kosodélníkový pixel [5].....	20
Obrázek 6: Transformace mezi WCS a VCS [3].....	21
Obrázek 7: Základní typy pohybu [1].....	22
Obrázek 8: Grafické znázornění výpočtů dvojic $[r_{ij}; p_{ij}]$ v matici korespondenčních párů pro $i$ -tý významný bod v obrázku A(x,y) [18].....	27
Obrázek 9: Moaré vzor tvořený dvěma vzory rovnoběžných čar; jedna s různými periody [6].....	28
Obrázek 10: Ukázka moaré pruhů [6].....	29
Obrázek 11: Šikmé, stejně nakloněné moaré vzory [6] .....	31
Obrázek 12: Šikmé, různě nakloněné moaré vzory [6] .....	31
Obrázek 13: Výpočet úhlů sklonu moaré pruhů jako funkce úhlů sklonu spodní a horní vrstvy [6].....	32
Obrázek 14: Dva moaré vzory se stejnou periodou, kdy jeden z nich je otočený vůči druhému .....	34
Obrázek 15: Model měřicího systému .....	35
Obrázek 16: Ukázka teoretického přípravku .....	36
Obrázek 17: Osy, kolem které probíhá otáčení dle úhlů $uhelx$ , $uhely$ , $uhelz$ .....	38

Obrázek 18: Osy, podél které se kamera posouvá dle parametrů $k_x$ , $k_y$ , $k_z$ .....	38
Obrázek 19: Obrázek vygenerovaný pomocí funkce <i>generate_moire</i> .....	42
Obrázek 20: Příklad rozostření obrázku s Gaussův filtrem, jehož rozptyl byl nastaven podle výše popsané metody .....	47
Obrázek 21: Obrázek binarizovaný prahem 0 .....	49
Obrázek 22: Obrázek binarizovaný pomocí Otsuovi metody .....	49
Obrázek 23: Normalizovaný rozostřený obrázek s průběhem jasových hodnot jednoho řádku a míst, kde se byly nalezeny minima .....	50
Obrázek 24: Schéma pracoviště při experimentu určení vzdálenosti vzoru (vzhled z osy $Y$ ).....	53
Obrázek 25: Rozostřený obrázek pořízen při podmínkách: $rot_z=2^\circ$ .....	57
Obrázek 26: Otočený obraz s označenými sloupci, jejichž součet dává největší detekovaný maximum.....	58
Obrázek 27: Detekovaná maxima jednotlivých řádků.....	60
Obrázek 28: Maxima řádků zobrazené na pomocné binárním snímku .....	61
Obrázek 29: Maxima řádků v binárním snímku po morfologické uzavření .....	61
Obrázek 30: Nalezené dominantní čáry pomocí Houghovi transformace .....	63
Obrázek 31: Skelet binarizovaného a normalizovaného obrazu.....	65
Obrázek 32: Výsledný obrázek (vlevo) a tentýž obrázek po rozostření (vpravo) při natočení horního vzoru o $45^\circ$ v kladném směru .....	70
Obrázek 33: Ukázka pracoviště při měření úhlu otočení kole osy $X$ vzhled z leva .....	73
Obrázek 34: Ukázka vygenerovaného obrazu .....	74
Obrázek 35: Skica pro určení maximálního sklonu.....	75
Obrázek 36: Schéma pracoviště při experimentu určení natočení vzoru v ose $Y$ .....	78
Obrázek 37: Ukázka změny periody dolního vzoru se vzdáleností od počátku .....	78

Obrázek 38: Rozostřený obrázek výsledku získaný otočením vzoru kolem osy $Y$ (s detekovanými maximy) .....	79
Obrázek 39: Ilustrace pro princip měření rotaci kolem osy $Y$ .....	81
Obrázek 40: Obrázek ukazující vliv algoritmu pro filtraci maxim.....	82
Obrázek 41: Grafické uživatelské prostředí vytvořené aplikací (levá a prostřední část nahoře, pravá část dole) .....	84

# Seznam grafů

Graf 1: Závislost úhlu moaré čar na úhlu natočení horního vzoru a na poměru period horní a dolní vrstvy [6] .....	33
Graf 2: Závislost periody $p_m$ na rozteče vzorů ( $p_m$ a $p_m$ ) .....	42
Graf 3: Relativní chyba metody „šířka pruhů“ na závislosti rozteče vzorů.....	43
Graf 4: Gaussovo rozložení s mediánem [0;0] a $\sigma=1$ [17].....	45
Graf 5: Závislost rozdílů maximálních a minimálních hodnot v rozostřeném obrazu s rostoucím sigma (modrá barva představuje nízké a žlutá barva vysoké jasové hodnoty) .....	46
Graf 6: Rozdíl minima a maxima hodnot obrázku po rozostření s Gaussovým filtrem s různými parametry $\sigma$ (rozteč vzoru je 200 mm).....	47
Graf 7: Relativní chyba určení periody moaré z rozostřeného obrázku na závislosti rozteče vzorů.....	51
Graf 8: Relativní chyba metody určení vzdálenosti.....	54
Graf 9: Porovnání relativní chyby metody určení vzdálenosti vzorů pomocí moaré záznejů a z původního obrázku.....	55
Graf 10: Absolutní chyba určení otáčení horního vzoru vůči dolnímu .....	59
Graf 11: Výsledek Houghovi transformace Obrázek 28 .....	62
Graf 12: Absolutní chyba metody určení sklonu moaré přímky pomocí Houghova transformace z maxim řádků na celém intervalu .....	63
Graf 13: Absolutní chyba metody „otáčení skeletu“ na intervalu .....	65
Graf 14: Absolutní chyba metody „proložení skeletu přímkou“ .....	66
Graf 15: Porovnání relativní chyby metody „jednoduchá rotace“ a „proložení skeletu přímkou“ .....	67
Graf 16: Porovnání relativní chyby metody „otáčení skeletu“ a určení „proložení skeletu přímkou“ .....	67

Graf 17: Porovnání relativní chyby metody „jednoduchá rotace“, „proložení skeletu přímkou“, „otáčení skeletu“ .....	68
Graf 18: Porovnání relativní chyby metody určení úhlu natočení kolem osy Z pomocí měření sklonu moaré záznejů a s klasickou metodou .....	69
Graf 19: Relativní chyba metody určení úhlu natočení vzoru v ose Z pomocí periody moaré interference. ....	71
Graf 20: Relativní chyba metody určení úhlu natočení vzoru v ose Z pomocí periody moaré interference na užším intervalu s krokem $0,01^\circ$ .....	71
Graf 21: Porovnání relativní chyby metody určení úhlu natočení kolem osy Z pomocí měření periody moaré záznejů a z původního obrázku .....	72
Graf 22: Absolutní chyba algoritmu pro natočení vzoru v ose X .....	76
Graf 23: Porovnání relativní chyby metody určení úhlu natočení kolem osy X pomocí měření sklonu moaré záznejů z původního obrázku .....	77

# Úvod

Cílem této diplomové práce je návrh a testování algoritmů schopných detekovat malé změny objektů ve scéně. Obsah práce je rozdělen na dvě hlavní části: na teoretickou a na praktickou část. Teoretická část práce je tvořena třemi kapitolami. Ty jsou pak následovány dalšími třemi kapitolami praktické části.

První kapitola popisuje základní matematiku snímání objektů kamerou. Je zde věnována větší pozornost tzv. pinhole modelu kamery, jenž byl použitý pro pořízení snímků pro další zpracování.

Kapitola druhá se věnuje detekci změn ve snímané scéně. Jsou zde rozebrány různé metody pro detekci a analýzu pohybu.

Třetí kapitola vysvětluje moaré efekt. Zahrnuje základní popis efektu, využití efektu pro měření pohybu či dislokaci a odvození základních matematických vztahů. Vzorce odvozené v této kapitole budou v dalších částech práce sloužit jako axiomy, z nichž budou další vztahy odvozené.

Čtvrtá kapitola řeší návrh a vlastnosti navrženého systému kamery pomocí počítačového algoritmu. Tento systém slouží jako zdroj všech pořízených obrázků v této práci. Obrázky v kapitole poskytují vizuální pohled na sestavu, který pomáhá uživatelům lépe pochopit možnosti a omezení navrženého systému.

Pátá kapitola je o návrhu a testování navržených algoritmů. Podkapitoly této části řeší měření různých veličin a pohybů. Každé měření je popsáno teoreticky, obsahuje analyticky odvozené vztahy podmínek, za jakých může daný algoritmus fungovat. Jsou zde podrobně popsány hlavní kroky algoritmu a výsledky získané daným algoritmem.

V šesté kapitole je pozornost věnována vytvořené aplikaci pro měření jednotlivých pohybů, jejichž detekce byla řešená v této práci.

# 1. Teorie promítání

Při snímání objektů kamerou zobrazujeme trojrozměrné objekty ve dvourozměrném poli. Transformace, která charakterizuje převod trojrozměrného objektu do dvourozměrné reprezentace, se nazývá promítání. Při promítání dochází ke ztrátě prostorové informace a může dojít i ke zkreslení tvaru objektu. Existují různé způsoby promítání pro zvýšení reálného vjemu promítnutého objektu. Promítacími metodami se zabývá deskriptivní geometrie [2]. V dalších odstavcích je uvažováno pouze promítání do rovinné průmětny.

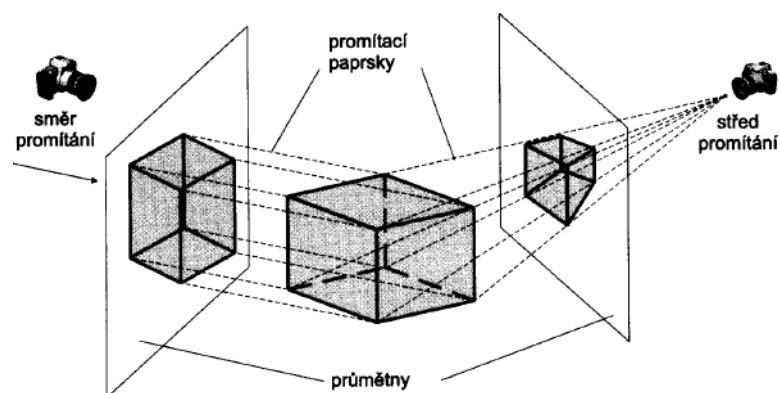
## 1.1 Základní pojmy

Promítací paprsek je polopřímka vycházející z promítaného (prostorového) bodu, jejíž směr závisí na promítací metodě.

Průmětna je plocha v prostoru, na kterou dopadají promítací paprsky a v místě dopadu vytvářejí průmět (obraz v průmětně).

Pokud je průmětna rovinná, prostorové úsečky se promítají do úseček v rovině (transformace je nezakřivuje), proto není třeba promítat všechny body prostorových objektů. V případě úseček stačí promítat pouze počáteční a koncové body.

Rovinné promítání je děleno na dvě třídy: paralelní a perspektivní. První je určeno směrem promítání (tzn. všechny promítací paprsky mají stejný směr), perspektivní promítání je charakterizováno středem promítání (promítací paprsky vycházejí z jednoho bodu). [2]



**Obrázek 1: Objekt a jeho průmět v paralelním promítání (vlevo) a ve středovém promítání (vpravo)**

## 1.2 Proces promítání

Proces promítání je možné rozdělit na následující kroky:

1. Volba souřadnicových systémů – světový souřadnicový systém WCS (WCS – World Coordinate System) a souřadnicový systém průmětny VCS (Viewing Coordinate System)
2. Formulace promítací úlohy (výběr geometrických parametrů: bodů, vektorů...), průmětny směru a dalších.
3. Stanovení transformace, která popíše promítání prostorových bodů do průmětny
4. Nalezení transformace mezi souřadnicovými systémy WCS a VCS a její vyjádření v maticovém tvaru.

Cílem je najít transformační matici nebo více transformačních matic, které definují transformace souřadnic promítaných bodů. Postupné transformace (případ použití více transformačních matic) se používají v případě, kdy během promítání jsou prováděny další výpočty (například ořezávání), které není vhodné řešit v souřadnicovém systému průmětny. [2]

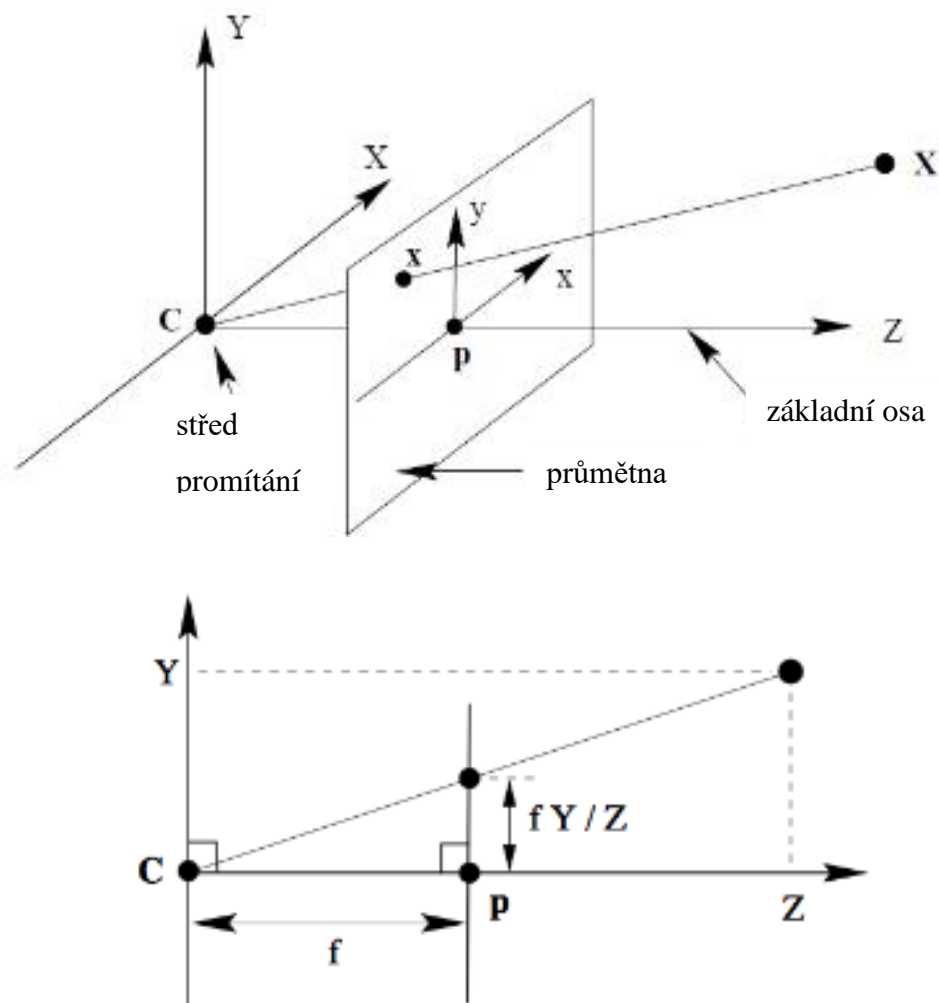
## 1.3 Perspektivní promítání

Perspektivní promítání odpovídá optickému modelu, který vyjadřuje lidské vidění reálného světa. Modeluje proporcionalní zmenšování předmětů při vzrůstající vzdálenosti od pozorovatele. Na Obrázek 2 je vidět průmět bodu  $X$  na průmětovou rovinu. Pozorovatel se nachází v počátku souřadnicového systému a průmětna je kolmá na osu  $Z$ . [2]

Poznámka: Na Obrázek 2 průmětna je před středem promítání, což v reálných případech neplatí (průmětna leží za čočkou), ale vzhledem k jednodušší představitelnosti a z hlediska pinhole modelu kamery bude v následujících kapitolách uvažována poloha průmětny před středem promítání. V reálu by tato změna měla vliv na ohniskovou vzdálenost (byla by záporná). Na základě trojúhelníkové podobnosti pro souřadnice bodu  $p(x, y)$  platí:

$$x = f \cdot \frac{X}{Z}, \quad y = f \cdot \frac{Y}{Z} \quad (1)$$





**Obrázek 2: Geometrie pinhole kamery, kde C je střed promítání (kamery) a p je počáteční bod průmětny; případ: průmětna je před kamerou [3]**

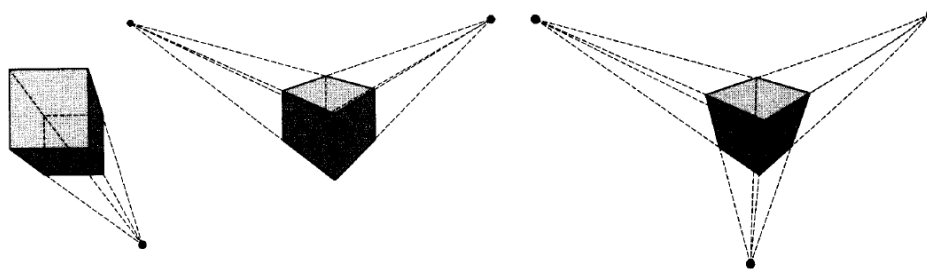
Mohou nastat 3 různé případy na základě podílu  $f/Z$  :

1. Objekty za průmětnou jsou při zobrazení zmenšeny
2. Objekty průmětně se promítanou ve své velikosti
3. Objekty před průmětnou se na obraze zvětší

Charakteristickým rysem středového promítání je, že nezachovává rovnoběžnost úseček; tzn. že rovnoběžné úsečky v prostoru nebudou rovnoběžné na průmětně, pokud nejsou rovnoběžné s průmětovou rovinou. [2]

Průmětna sice může mít libovolnou polohu, ale z praktického hlediska jsou uvažovány pouze tři různé případy, které odpovídají orientaci průmětny vůči osám souřadnicového systému.

1. Jednobodová perspektiva – průmětna protíná jedinou souřadnicovou osu. Všechny úsečky kolmé na průmětnu míří do hlavního úběžníku.
2. Dvoubodová perspektiva – průmětna protíná dvě ze souřadnicových os. Hrany osově orientovaných kvádrů směřují do dvou hlavních úběžníků.
3. Trojbodová perspektiva je nejobecnější případ, který vzniká, pokud průmětna promítá všechny tři souřadnicové osy. [2]



**Obrázek 3: Středové promítání jednobodové (vlevo), dvoubodové (uprostřed) a trojbodové (vpravo) [2]**

Úběžníky jsou body, kde se „rovnoběžné přímky protínají“. [2]

## 1.4 Pinhole kamera model

Nejjednodušší model kamery. V euklidovském prostoru obraz bodu  $\vec{X} = [X \ Y \ Z]^T$  je promítán na bod v průmětně, kde promítací paprsek (jdoucí do středu promítání  $C$ ) protne průmětnu. Podle podobností trojúhelníků lze snadno vypočítat polohu mapovaného bodu;  $\vec{X}_p = \begin{bmatrix} f \frac{X}{Z} & f \frac{Y}{Z} \end{bmatrix}^T$  [3]

$$\mathbb{R}^3 \xrightarrow{TF} \mathbb{R}^2$$

$$[X, Y, Z]^T \xrightarrow{TF} \begin{bmatrix} f \frac{X}{Z} & f \frac{Y}{Z} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

### 1.4.1 Perspektivní promítání s homogenními souřadnicemi

Když jsou WCS i VCS souřadnice reprezentovány homogenními vektory, potom lze perspektivní promítání velice jednoduše vyjádřit jako lineární transformaci mezi jejich souřadnicemi. Maticově lze psát následující rovnici: [3]

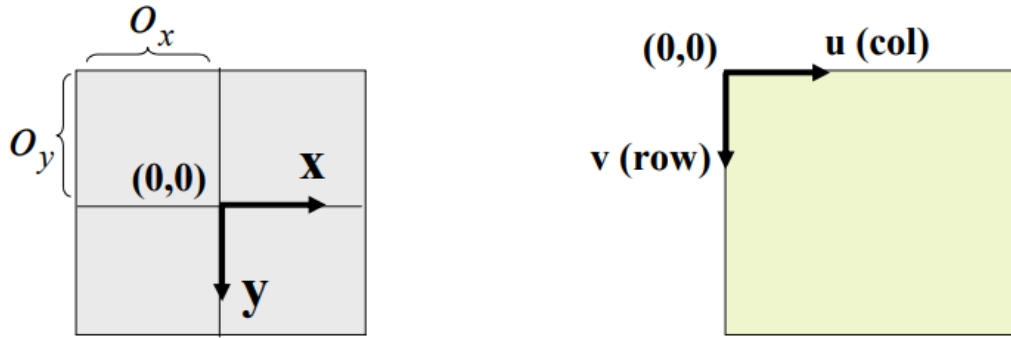
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{TF} \begin{bmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matici v rovnici lze zapsat jako  $\text{diag}(f, f, 1) [I | \mathbf{0}]$ , kde  $\text{diag}(f, f, 1)$  je diagonální matice a  $[I | \mathbf{0}]$  reprezentuje jednotkovou matici  $3 \times 3$  rozšířenou o nulový vektor na pravé straně. Světové souřadnice prostorového bodu  $\vec{X}$  jsou reprezentovány homogenním vektorem  $[X \ Y \ Z]^T$ . Dříve odvozená matice je tzv. projekční matice kamery  $P$ . Poloha bodu na průmětně je potom: [3]

$$\vec{X}_p = P \cdot \vec{X} \quad (4)$$

### 1.4.2 Posunutí počátečního bodu

Transformace podle vzorce (2) platí pouze v případě, kdy počáteční bod leží uprostřed průmětny.



**Obrázek 4: Počátek souřadnicového systému obrazu (u,v) a kamery (x, y) [4]**

Ve skutečnosti počáteční body obrazu a střed kamery jsou vůči sobě posunuté. Obecně teda platí:  $[X, Y, Z]^T \xrightarrow{TF} \left[ f \frac{x}{z} + o_x, f \frac{y}{z} + o_y \right]^T$ .

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{TF} \begin{bmatrix} fX + Zo_x \\ fY + Zo_y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

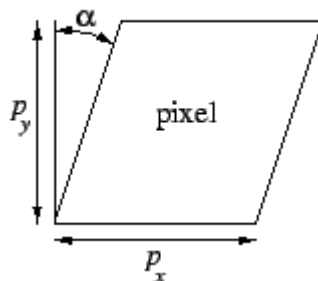
### 1.4.3 Intrinzické parametry kamery

Matice v rovnici (5) se nazývá kalibrační matice kamery. Projekce  $[x, y]^T$  je snadno vypočitatelná podělením členů výsledného vektoru jeho posledním členem. Matici se

říká matice vnitřních (intrinzičických) parametrů kamery, tzn. že členy této matice záleží čistě na kameře, nikoli na její umístění v prostoru či orientaci. V případě reálné CCD (angl. charge-coupled device) kamery mohou být jednotlivé členy jiné:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & o_x & 0 \\ 0 & f_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Kde  $f_x = \frac{f}{p_x}$  a  $f_y = \frac{f}{p_y}$  jsou zobrazovací konstanty;  $p_x$  a  $p_y$  jsou velikosti pixelu v ose  $X$  a  $Y$ . Pixel kamery nemusí být nutně čtvercový, navíc může být zkosený, jak je zobrazeno na Obrázek 5, z čehož plyne, že  $s = \tan(\alpha) \cdot f/p_y$ . [5]

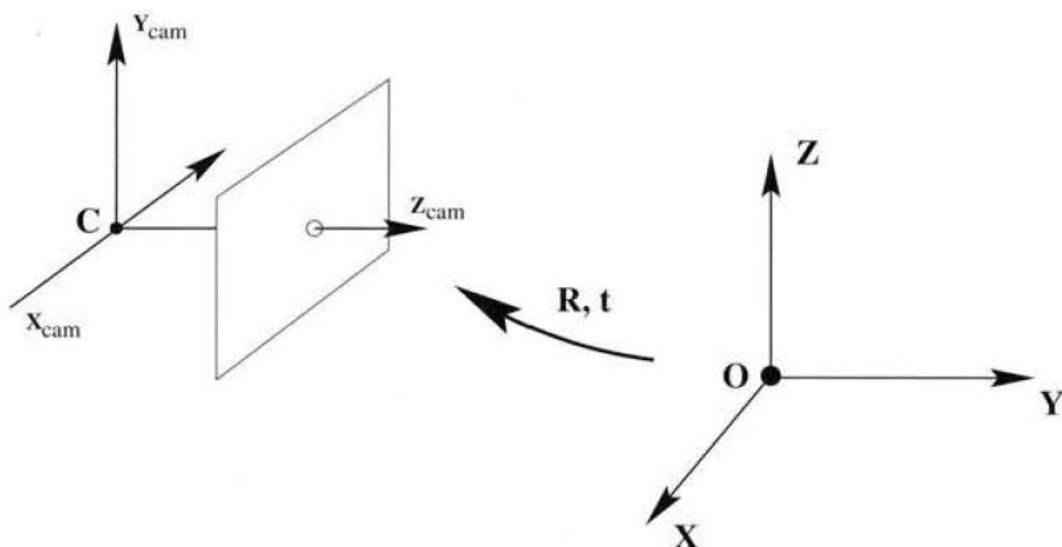


**Obrázek 5: Kosodélníkový pixel [5]**

Velikost a nerovnost pixelu kamery není brána v potaz, neboť tato práce simuluje pouze teoretickou kameru. Dnešní kamery tuto nerovnost pixelu už téměř nemají.

#### 1.4.4 Extrinzičné parametry systému

Extrinzičné parametry nejsou definovány kamerou, ale polohou a orientací kamery v prostoru. Obecně platí, že body v prostoru jsou vyjádřeny v jiném euklidovském souřadnicovém systému, než je souřadnicový systém obrazové roviny. Tyto souřadnicové systémy jsou vůči sobě rotované a posunuté. [3]



**Obrázek 6: Transformace mezi WCS a VCS [3]**

Když  $\vec{X}$  je prostorový bod vyjádřen v světových souřadnicích a  $\vec{X}_p$  je jeho obraz na obrazové rovině, je možné psát rovnici  $\vec{X}_p = \mathbf{R}(\vec{X} - \vec{C})$ , kde  $\vec{C}$  reprezentuje polohu středu kamery a  $\mathbf{R}$  je rotační matice (o rozměrech  $3 \times 3$ ) reprezentující orientaci obrazové roviny. Často je vhodnější střed kamery určit explicitně a spíše reprezentovat transformace WCS na VCS jako  $\vec{X}_p = \mathbf{R}\vec{X} + \mathbf{t}$ . V tomto případě je transformační matice:

$$P = K[R|t] \quad (7)$$

## 2. Detekce změn ve scéně

Reálný pohyb kamery je možné snímat na posloupnosti obrazu. Pohyb v obraze je možné detekovat za různých předpokladů: např. zda byl pohyb zachycen statickou či mobilní kamerou. Z hlediska praxe lze nalézt tři hlavní typy úloh: pouhá detekce pohybu, nalezení pohybujících se objektů, získání trojrozměrné vlastnosti objektu. Ačkoli se v souvislosti s analýzou pohybu hovoří o dynamické analýze, často jsou namísto posloupnosti obrazů užívány jen dva nebo tři obrazy pohybu.

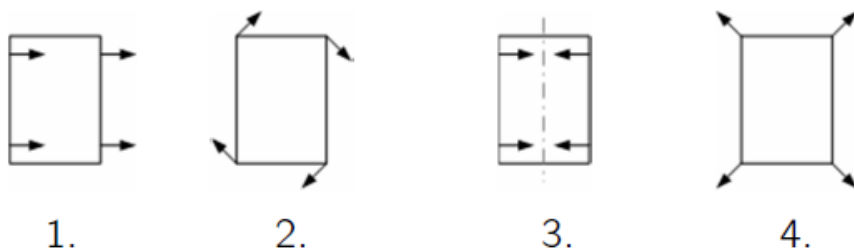
### 2.1 Metody pro detekci pohybu

Pohyby objektu ve třech rozměrech lze projektovat do obrazové roviny ve dvourozměrném prostoru. K tomu dojde, když reálnou scénu snímáme kamerou. Jasové paprsky odražené od objektu budou detekovány fotosenzitivním čipem kamery. Promítaný pohyb má určité omezení:

1. Redukce informací (projekce  $3D \xrightarrow{T} 2D$ )
2. Transformace spojité obrazové projekce do vzorkovací mřížky (diskretizace signálu)

Reálný pohyb objektu můžeme zachytit pomocí jedné kamery, když se jedná o pozorovatelný pohyb v obrazové rovině. Libovolný pohyb je kombinace čtyř základních pohybů: [1]

1. Translace v konstantní vzdálenosti
2. Rotace v konstantní vzdálenosti
3. Rotace kolem osy kolmé na osu objektivu
4. Translace do dálky



Obrázek 7: Základní typy pohybu [1]

## 2.2 Rozdílové metody analýzy pohybu

V sekvenci obrazů je možné detekovat pohyb zachycený stacionární kamerou při konstantním osvětlení. Pod rozdílovým obrazem je chápán takový binární obraz  $d$ , jehož nulové hodnoty představují sobě odpovídající místa obrazů  $f_1$  a  $f_2$ , v nichž nedošlo k výrazné změně jasových hodnot mezi okamžiky snímání obou obrazů.[1]

$$d_{1,2} = \begin{cases} 0 & \text{pro } |f_1(i,j) - f_2(i,j)| < e \\ 1 & \text{jinak} \end{cases} \quad (8)$$

Kde  $e$  je předem určený práh. Vytváření rozdílového snímku může být založeno na komplexnějších vlastnostech jako třeba na střední hodnotě jasových hodnot v určitém okolí. Prvek rozdílového snímku může nabývat hodnoty 1 z těchto příčin: [1]

1. Element  $f_1(i,j)$  byl součástí pohybujícího se objektu a  $f_2(i,j)$  byl elementem nepohybujícího se pozadí (nebo obráceně)
2. Element  $f_1(i,j)$  byl elementem pohybujícího se objektu a  $f_2(i,j)$  elementem jiného pohybujícího se objektu
3. Oba elementy  $f_1(i,j)$  a  $f_2(i,j)$  byly části téhož pohybujícího objektu v místech různého jasu
4. Vlivem šumu či nepřesnosti snímání se v rozdílovém obrazu objeví řada nesprávně detekovaných elementů.

Zmíněné chyby musí být potlačeny. Nejjednodušší způsob potlačení chyb, je odstranění všech oblastí rozdílového snímku menší než určená stanovená velikost. To ale může způsobit jinou chybu, že malé pohyby či pohyby malých objektů nebudou detekovány. [1]

Z prostého rozdílového snímku nelze určit směr pohybu. Tuto chybu eliminuje užívání kumulativního rozdílového snímku. Ten už nese informaci o směru pohybu a dále se projeví i pohyb malých objektů a malých pohybů. Metoda pracuje s referenčním obrazem  $f_r$ . Hodnota kumulativního rozdílu říká, o kolik se hodnota jasu ve snímcích lišila od hodnoty jasu v referenčním obrazu. [1]

$$d_{kum}(i,j) = \sum_{l=1}^n a_l \cdot ||f_1(i,j) - f_l(i,j)|| \quad (9)$$

Kde  $a_l$  je váhový koeficient reprezentující významnost jednotlivých obrazů v čase

a  $n$  je počet obrazů v posloupnosti. Problémem tohoto postupu je získání referenčního obrazu stacionární scény. Toho lze dosáhnout třemi způsoby: [20]

1. Pořízením obrazu čistého prostředí bez pohybujících se objektů
2. Průměrováním sérií snímků
3. Použitím prvního snímku posloupnosti jako referenční (naivní řešení).

## 2.3 Lokální příznaky a korespondence

Na rozdíl od snímání pohybu v posloupnosti obrazů jsou někdy užívány jen dva či tři obrazy ze sekvence. V tomto případě zpracování spíše odpovídá statické analýze obrazů. Po segmentaci objektu jsou hledány korespondenční body či oblasti mezi obrazy. Tento typ snímání lze používat pro:

- Sledování trajektorii pohybu
- Rozpoznávání objektu
- Rekonstrukci prostorového obrazu
- Databázové vyhledávání

Změny ve scéně mohou být:

- Geometrické: translace, rotace, perspektiva...
- Jasové: barva, kontrast, jas
- Fyzické: změna konfigurace objektů, zakrytí části objektu

Pro nalezení korespondenčních bodů (tentýž fyzický bod) v obraze je zapotřebí nalézt vhodné „potencionálně významné body“ a najít jejich ekvivalent. Nalezení významných bodů může probíhat jednoduchým detektorem rohů a hran nebo pokročilejšími metodami jako například Harrisův detektor významných bodů. [20]

### 2.3.1 Detektory příznaků

Prvním krokem pro nalezení lokálních příznaků/bodů v obraze je jejich detekce. Za významný bod jsou považovány body, které jsou co nejméně podobné svému okolí, představují hrany či rohy objektů.



### Moravcův operátor

Moravcův operátor funguje jako filtr. V okolí jednoho bodu je brána oblast, podle které je vypočítána výsledná hodnota odezvy. Matematicky popsáno následovně: [1]

$$g(i, j) = \frac{1}{8} \sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} |f(i, j) - f(m, n)| \quad (10)$$

kde  $g(i, j)$  je odezva filtru

$f(i, j)$  je vstupní obraz

V tomto případě je považován okolí bodu 3x3 pixelů

Jak je ze vzorce patrné, tento filtr může mít 3 zásadní odezvy:

1. nulovou odezvu na plochou oblast (kde jsou v okolí bodu pixely se stejnou jasovou hodnotou jako snímáný pixel) je nulová
2. Pro hrany má malou odezvu (ve všech 8 směrech)
3. pro rohy největší (když střední bod je obklopen více než 4 body, které mají různou hodnotu než snímáný pixel)

### Harrisův kombinovaný detektor rohů a hran [13]

Tento kombinovaný detektor byl vytvořen jako vylepšení Moravcova operátoru. Algoritmus je založen na auto-korelační funkci.

$$c(x, y) = \sum_{(u,v) \in (x,y)} w(u, v) \cdot [I(u, v) - I(u + \Delta x, v + \Delta y)]^2 \quad (11)$$

Kde:  $w(u, v)$  je váhová funkce

$I(u, v)$  je jasová funkce

$(\Delta x, \Delta y)$  je lokální posun okénka

Váhování funkce může být konstantní (nejčastěji jedna) nebo podle Gaussova rozložení  $w(u, v) = e^{-\frac{(u-x)^2 + (v-y)^2}{2\sigma^2}}$ . Pokud uvažujeme konstantní  $w(u, v)$  a posunutí  $(\Delta x, \Delta y)$  aproximujeme Taylorovým rozvojem prvního řádu, dostaneme vztah:

$$I(u + \Delta x, v + \Delta y) \approx I(u, v) + [I_x(u, v) \quad I_y(u, v)] \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (12)$$

Po aproximaci parciální derivace jasové funkce diferencí dostaneme jiný tvar korelační funkce. Matice  $C(x, y)$  je čtvercová a má dvě vlastní čísla  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ , které jsou rotačně nezávislé příznaky.

$$\begin{aligned} [\Delta x \quad \Delta y] \cdot \begin{bmatrix} \sum_w I_x^2(u, v) & \sum_w I_x(u, v) I_y(u, v) \\ \sum_w I_x(u, v) I_y(u, v) & \sum_w I_y^2(u, v) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \\ = [\Delta x \quad \Delta y] \cdot C(x, y) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

Možné kombinace vlastních čísel:

- 1  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  mají obě nízké hodnoty – autokorelační funkce je plochá, tzn. že obraz v okně popisuje plochou oblast (vykazuje nízkou jasovou variaci)
- 2 Jeden z dvojice  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  má nízkou, další vysokou hodnotu – autokorelační funkce má hřbet, tzn. že obraz v okně má hranu.
- 3 Oba vlastní čísla mají vysoké hodnoty – autokorelační funkce má vrchol, tzn. že zkoumaná oblast obsahuje roh.

Indikátor přítomnosti rohu  $H(\lambda_1, \lambda_2)$  se vypočítá následovně:

$$H(\lambda_1, \lambda_2) = \det(C(x, y)) - \kappa \cdot \text{trace}(C(x, y))^2 \quad (14)$$

### 2.3.2 Nalezení korespondenčních párů

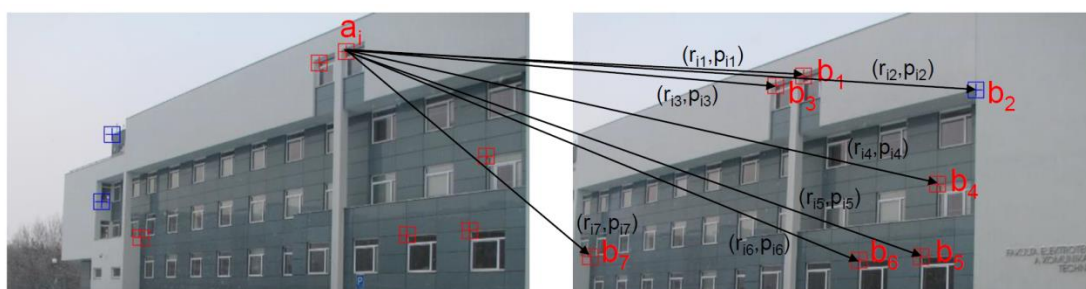
V předchozí podkapitole byly ukázány dvě poměrně jednoduché způsoby pro detekci významných bodů. Po nalezení těchto bodů je zapotřebí najít stejný bod v dalším obraze. Když  $A(x, y)$  a  $B(x, y)$  jsou dva po sobě jdoucí obrazy a vektory  $a$ ,  $b$  jsou vektory obsahující nalezené významné body ( $a$  reprezentuje významné body v obraze  $A$ ,  $b$  reprezentuje významné body v obraze  $B$ ), potom probíhá mapování korespondenčních párů následovně:

1. Určení všech potenciálních korespondencí
2. Určení věrohodnosti těchto korespondenčních párů
3. Mapování korespondenčních párů

U reálných objektů by vzájemná poloha korespondenčních párů měla splnit podmínku konečné změny;  $\|a_i - b_j\| < r_{max}$ . Korespondence nevyhovující podmínce jsou vyřazeny (příslušné  $p_{ij}$  jsou nastavena na 0). Dále je třeba určit konzistenci

korespondencí (vyplývá z předpokladů pohybů tuhých těles):  $\|r_{ij} - r_{kl}\| < r_{kon}$ . Jinými slovy body tuhého tělesa by měly zachovat nějakou poměrnou vzdálenost od sebe.

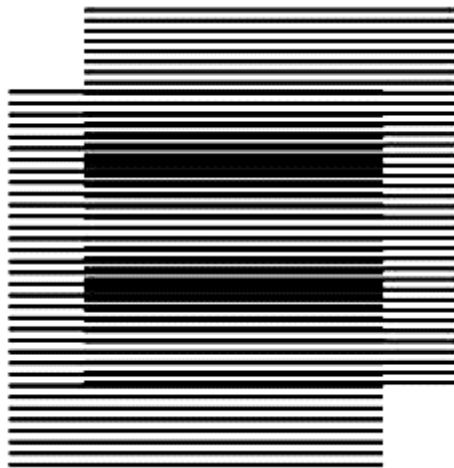
Podle dříve popsaných podmínek je sestavena matice uspořádaných dvojic  $M(r_{ij}, p_{ij})$ . Prvek  $M(i, j)$  určuje vektor vzdálenosti  $r_{ij}$  mezi významným bodem  $a_i$  obrazu  $A(x, y)$  a  $b_j$  obrazu  $B(x, y)$  a zároveň určuje pravděpodobnost korespondence  $p_{ij}$ . Pravděpodobnost korespondence bere v potaz okolí významných bodů. Pokud rozdíl jasových hodnot pixelů v okolí detekovaných významných bodů je malý (ideálně nulový), tak pravděpodobnost korespondence je vysoká a lze říci, že body  $a_i$  a  $b_j$  odpovídají stejnému bodu v prostoru. [18]



**Obrázek 8: Grafické znázornění výpočtů dvojic  $[r_{ij}; p_{ij}]$  v matici korespondenčních párů pro  $i$ -tý významný bod v obrázku  $A(x, y)$  [18]**

### 3. Moaré efekt

V matematice a ve fyzice moaré efekt je rušivý optický efekt vznikající překrýváním dvou pravidelných málo odlišných rastrů. Termín moaré pochází z francouzštiny. Je to druh textilu (originálně z hedvábí) se zvlněným vzhledem. [6]



**Obrázek 9: Moaré vzor tvořený dvěma vzory rovnoběžných čar; jedna s různými periody [6]**

Moaré záznamy jsou často artefaktem obrazů vytvářených různými technikami digitálního zobrazení a počítačové grafiky. Moaré efekt může být i užitečný, například jako typ prevence padělání bankovek, nebo pro bezkontaktní měření povrchu materiálu, či měření dislokací předmětů v prostoru pomocí kamery. Pro naposledy zmíněný případ existují různé, předem definované moaré vzory (kružnice, pruhy atd.). [6]

Nejpoužívanější jsou takzvané Ronchiho mříže. Jedná se o vzory skládající se z tmavých a světlých vzájemně souběžných pruhů. Přejít mezi oblastmi je ideálně skokový. [7]

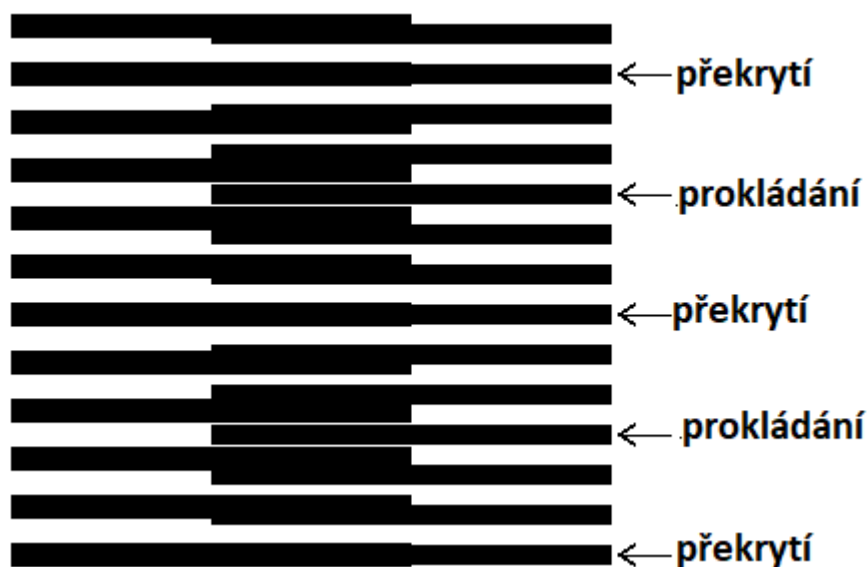
Moaré fenomén lze považovat za zvláštní případ interference, která nevzniká v důsledku interakce vlnových front, ale vzniká periodickými strukturami s různými prostorovými frekvencemi. V literatuře se na něj odkazuje mechanická či geometrická interference. Je zřejmé, že výsledný jev je spojen se základními pruhy, které jej vytvářejí; takže základní myšlenkou měření moaré efektu je, že pokud jeden ze základních vzorů souvisí s určitým stavem zkoumaného objektu (např. leží na povrchu daného objektu) a druhý s jiným (například s referenčním) stavem, tak z výsledného

obrázku obsahující moaré interference lze odvodit vzájemný vztah mezi těmito objekty. [8]

### 3.1 Superpozice paralelních pruhů

Moaré čáry jsou typem moaré vzoru, které vznikají při superpozici dvou průhledných vrstev obsahujících periody tmavých pruhů. V tomto případě tyto vzory jsou přímé, nebo šikmé proužky. Při pohybu vzorů vrstev se moaré vzory posouvají. Když se horní vrstva pohybuje kolmo k dolní vrstvě, moaré pruhy se pohybují podél stejné osy, ale rychleji než pohyb horní vrstvy. Tento efekt se nazývá optické moaré zrychlení.

Perioda moaré pruhů  $p_m$  je vzdálenost od jednoho bodu, kde se pruhy obou vrstev překrývají (viz Obrázek 10 dole) do dalšího takového bodu (prostřední označení téhož obrázku). [6]



Obrázek 10: Ukázka moaré pruhů [6]

V tomto případě platí, že perioda dolního vzoru je větší než perioda horního vzoru (protože se skládá z hrubších pruhů  $p_d > p_h$ , teda má jinou rozteč). V půlce periody  $p_m$  pruhy dolního vzoru předbíhají pruhy horního vzoru. Pruhy se vzájemně překrývají, takto vznikne černá oblast na místě překrytí (tlustší než pruh jednoho vzoru). Po celou periodu  $p_m$  pruhy dolního vzoru předbíhají pruhy horního vzoru o jednu periodu. Čárky spodní vrstvy získávají teda vzdálenost  $p_m$  s tolika řádky jako počet pruhů horní vrstvy

mínus jedna. [6]

$$\frac{p_m}{p_h} = \frac{p_m}{p_d} + 1 \quad (15)$$

Odtud je získán následující vztah pro periodu moaré vzoru:

$$p_m = \frac{p_d \cdot p_h}{p_d - p_h} \quad (16)$$

Pro případy, kdy  $p_d < p_h$   $p_m$  je absolutní hodnota výsledku vzorce (16). Jak je ze vzorce patrné, čím blíže periody vzorů jsou, tím větší bude perioda moaré. Když se horní vrstva posune kolmo na proužky dolní vrstvy o jednu celou periodu svého vzoru, výsledný optický obraz musí být stejný jako původní. Za předpokladu, že základní vrstva se nehýbe, je poměr rychlosti posuvu moaré záznejů ku rychlosti pohybu horní vrstvy rovný poměru periody těchto záznejů ku periodě pruhů horní vrstvy. [6]

$$\frac{v_m}{v_h} = \frac{p_m}{p_h} \quad (17)$$

Po dosazení za  $p_m$

$$\frac{v_m}{v_h} = \frac{p_d}{p_d - p_h} \quad (18)$$

Z výše uvedeného vzorce je patrné, že v případě, kdy periody dolního a horního vzoru jsou blízko k sobě, dochází k výraznému zrychlení pohybu moaré záznejů. Tato vlastnost se dá využít k sub-pixelové detekci pohybu v obrazu; kdy měření pohybu samotného vzoru použitou kamerou by nebylo možné, ale díky rychlejším pohybům moaré interference je možné detekovat i tyto malé posuny.

## 3.2 Superpozice šikmých pruhů

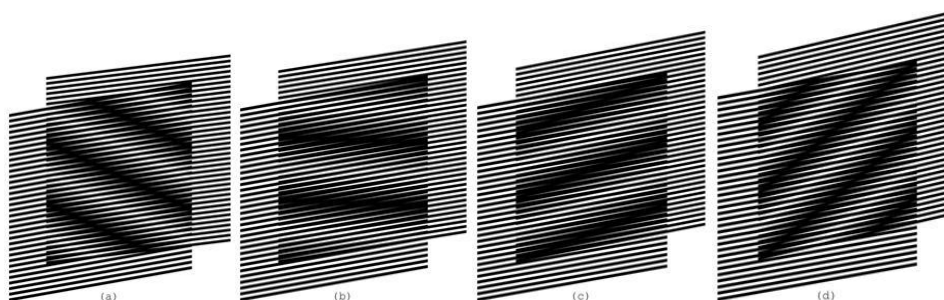
### 3.2.1 S různou periodou vzorů

Superpozice dvou vrstev se stejnými sklony vytváří moaré pruhy nakloněné ve stejném úhlu. Během sklonu je zachována vzdálenost mezi pruhy, avšak skutečná vzdálenost podél osy kolmé na pruhy se mění. [6]



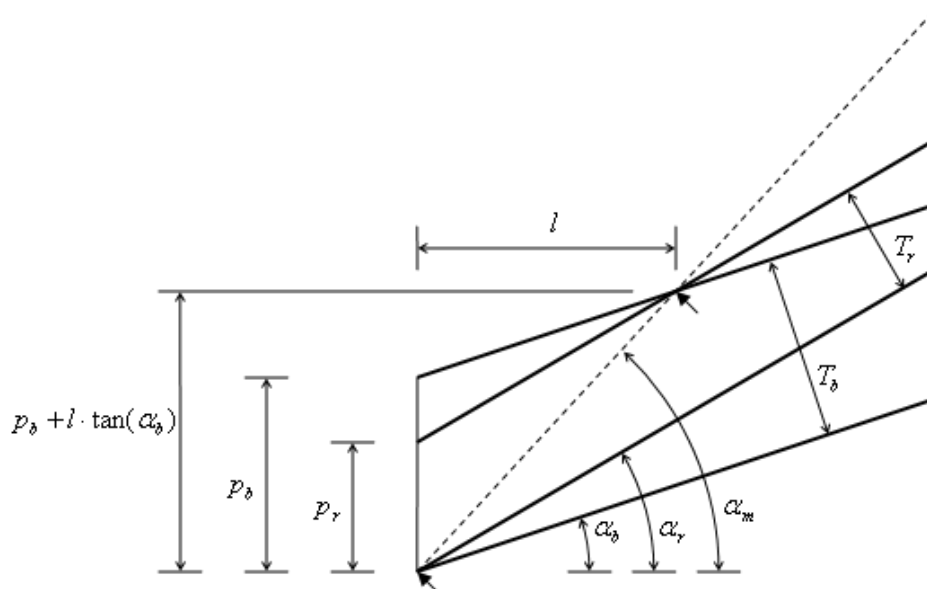
**Obrázek 11: Šikmé, stejně nakloněné moaré vzory [6]**

Příklad je ještě komplikovanější, když sklon pruhů vzorů není stejný pro horní a pro dolní vrstvy. Obrázek 12 ukazuje čtyři superpozice vzorů, kde stupeň sklonu dolní vrstvy je ve všech případech stejný ( $10^\circ$ ), ale sklon horních vrstev je odlišný:  $7^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $11^\circ$  a  $13^\circ$  na obrázcích a, b, c, d v tomto pořadí. [6]



**Obrázek 12: Šikmé, různě nakloněné moaré vzory [6]**

Obrázek 13 slouží jako pomůcka pro výpočet sklonů optických moaré pruhů jako funkce sklonu pruhů spodní a horní vrstvy.



**Obrázek 13: Výpočet úhlů sklonu moaré pruhů jako funkce úhlů sklonu spodní a horní vrstvy [6]**

Kde:  $p_b$  je perioda pruhů spodního vzoru (angl. base)  
 $p_r$  je perioda pruhů horního vzoru (angl revealing)  
 $T_b$  je skutečná vzdálenost mezi pruhy spodní vrstvy  
 $T_r$  je skutečná vzdálenost mezi pruhy horní vrstvy

Předpokládejme, že spodní vrstva má větší rozteč (resp. periodu) než horní vzor. Průsečíky pruhů spodní a horní vrstvy (na obrázku značené šipkami) leží na centrální ose ve směru světlých pruhů. Přerušovaná čára odpovídá ose světlých pruhů. Sklon moaré zánějů je tedy sklon přerušované čáry  $\alpha_m$ . [6]

Z Obrázek 13 lze odvodit vzorce:

$$\tan \alpha_m = \frac{p_b + l \cdot \tan \alpha_b}{l} \quad (19)$$

$$\tan \alpha_r = \frac{p_b - p_r + l \cdot \tan \alpha_b}{l}$$

Z těchto rovnic lze odvodit vztahy pro sklon moaré pruhů v závislosti na sklonech spodní a horní vrstvy:

$$\tan \alpha_m = \frac{p_b \cdot \tan \alpha_r - p_r \cdot \tan \alpha_b}{p_b - p_r} \quad (20)$$

V případě, že dolní vrstva není otočená, magnifikace tangenta úhlu natočení je



úměrná podílu  $\frac{p_b}{p_b - p_r}$ . Pro poměr period vzorů 100:90 to znamená desetinásobný rozdíl.

V případě natočení horní vrstvy o  $1^\circ$  sklon vzniklých záznejů se natočí zhruba o  $10^\circ$ . Avšak při větších úhlech natočení se tento efekt projeví méně; je to způsobeno inverzí funkce  $\tan$ . Stejným způsobem, jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, lze tento jev použít pro měření sub-pixelových změn v obraze.

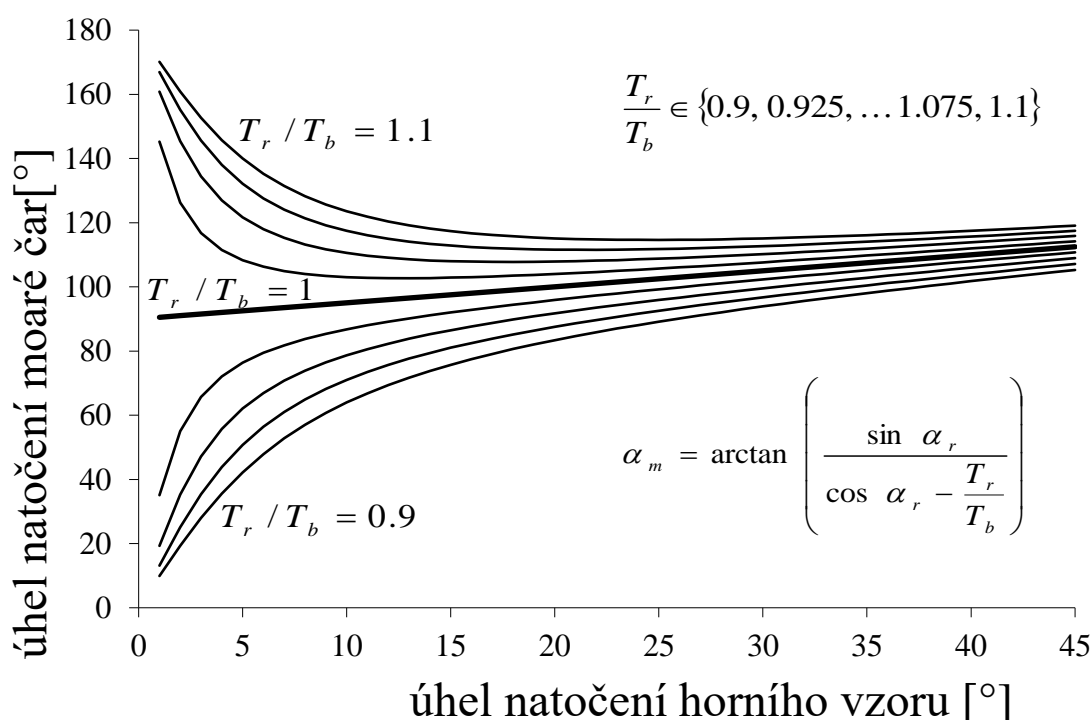
Z rovnice (20) lze odvodit vztah pro výpočet sklonu horního vzoru  $\alpha_r$  pro daný sklon čáry spodní vrstvy  $\alpha_b$  a sklon moaré čáry  $\alpha_m$  (tj. čáry vzniknuté superpozicí zmíněných vrstev).

$$\tan \alpha_r = \frac{p_r}{p_b} \tan \alpha_b + \left(1 - \frac{p_r}{p_b}\right) \tan \alpha_m \quad (21)$$

Dle rovnic (15) a (16) (odvozené v předchozí podkapitole) výraz  $\left(1 - \frac{p_r}{p_b}\right)$  je inverzí

$$\frac{\tan \alpha_r - \tan \alpha_b}{\tan \alpha_m - \tan \alpha_b} = \frac{v_r}{v_m} \quad (22)$$

vztahu pro optické zrychlení, takže pro poměr rychlostí posunutí platí: [6]

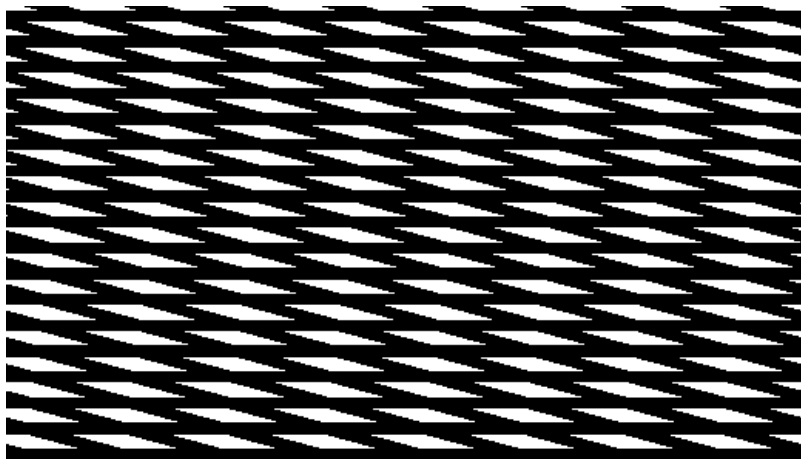


**Graf 1: Závislost úhlu moaré čar na úhlu natočení horního vzoru a na poměru period horní a dolní vrstvy [6]**

Průběh označený tlustou čarou na Graf 1 značí případ, ve kterém horní i dolní vzor mají stejnou rozteč.

### 3.2.2 Se stejnou periodou

Z Graf 1 je patrné, že v případě, kdy periody obou vzorů jsou stejné, náklon vzniklých moaré čar se mění velice pomalu s natočením vzorů, což při měření sklonů těchto čar přináší velkou nejistotu v určení úhlu natočení pohyblivého vzoru. Úhel natočení vzoru lze určit i z periody moaré čar za předpokládáme, že vzory mají stejnou rozteč, čili perioda horního vzoru se rovná periodě dolního vzoru  $p_r = p_b = p$ . Když jeden vzor je vůči druhému otočený, vznikají kosočtverce (jak je patrné z Obrázek 14).



**Obrázek 14: Dva moaré vzory se stejnou periodou, kdy jeden z nich je otočený vůči druhému**

Výška kosočtverce se rovná rozteči pruhů vzorů. Délku strany kosočtverce lze tedy určit na základě rozteče pruhů a úhlu otočení dle vztahu:

$$d = \frac{p}{\sin \alpha} \quad (23)$$

Světlé pruhy v obrazu odpovídají kratším úhlopříčkám kosočtverce. Protože úhlopříčky půlí vnitřní úhly kosočtverce, otočení bílých pruhů ve výsledném obrazu je potom  $\alpha/2$  a je současně kolmé na dlouhou úhlopříčku. Vzdálenost mezi dvěma bílými pruhy je  $vzd$ , polovina dlouhé úhlopříčky; ta je  $2 \cdot vzd$  dlouhá. Podle Pythagorovy věty lze odvodit vztah pro výpočet úhlu  $\alpha$ :

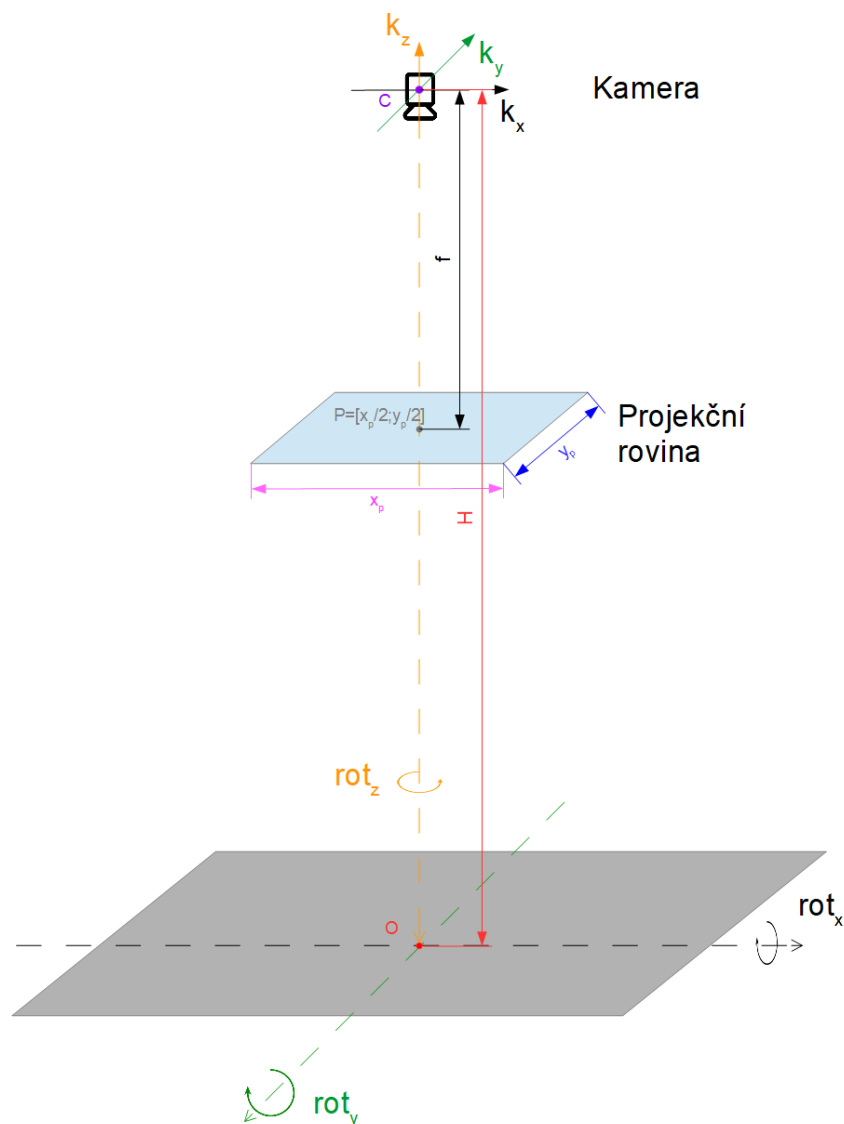
$$vzd = \frac{p/2}{\sin(\alpha/2)} \rightarrow \alpha = 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{p/2}{vzd} \right) \quad (24)$$

## 4. Měřicí systém

Protože během vypracování této práce nebyla školní laboratoř přístupná, bylo zapotřebí vytvořit model měřicího systému. Pro tento účel byl vytvořen tzv. pinhole model kamery (model kamery bez čočky).

### 4.1 Model systému

Pro vytváření modelu je třeba formulovat geometrickou situaci, tj. určit místo pozorovatele, pozici průmětny a směr a cíl pozorování. Model měřicího systému je na Obrázek 15.

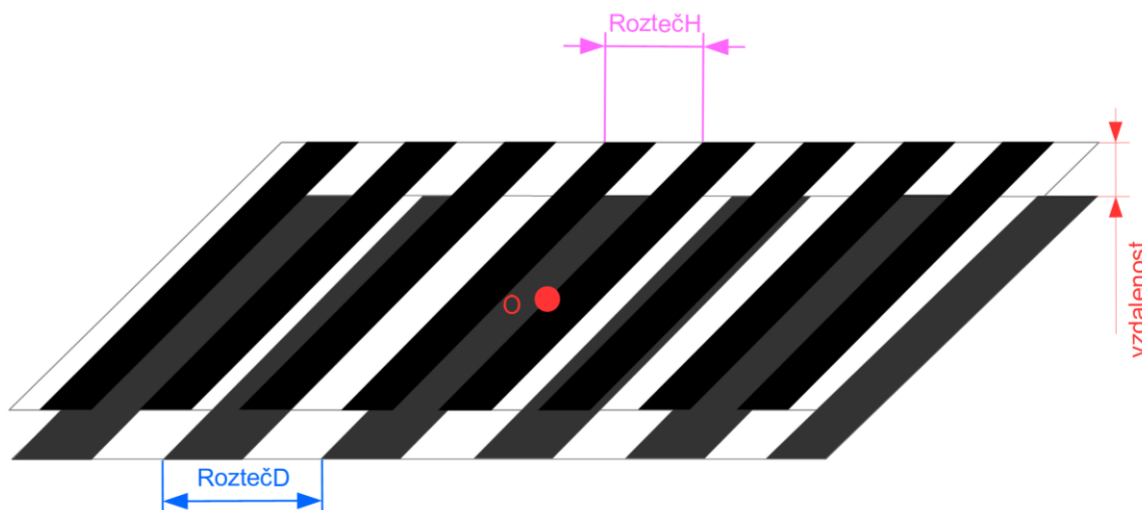


Obrázek 15: Model měřicího systému

Kde

- $C$  – střed promítání
- $P$  – střed projekční roviny
- $O$  – středový bod, kolem kterého se točí horní vzorek
- $f$  – fokusová vzdálenost
- $H$  – výška kamery od středového bodu
- $k_x$  – posun kamery v ose  $X$
- $k_y$  – posun kamery v ose  $Y$
- $k_z$  – posun kamery v ose  $Z$
- $x_p, y_p$  – rozměry projekční roviny

Přípravek je tvořen dvěma v prostoru paralelními syntetickými Ronchiho mřížemi. Mříže jsou přípravek pro optické měření, který obsahuje paralelní bílé a černé pruhy s ostrým přechodem mezi nimi a s téměř stoprocentním kontrastem. Ve skutečnosti jsou přípravky vyráběny ze skla, na kterém nalepena tenká chromová vrstva. Hustota světlých a tmavých čar se udává ve frekvencích: čáry/mm; předpokládá se stejná šířka světlých a tmavých pruhů. Jedna perioda je měřena od začátku tmavého pruhu po začátek dalšího tmavého pruhu.



**Obrázek 16: Ukázka teoretického přípravku**

Kde:

- $O$  – geometrický střed přípravku (stejný bod, jako na Obrázek 15)
- $RoztečD$  – rozteč neboli perioda dolního vzorku
- $RoztečH$  – perioda horního vzorku
- $vzdálenost$  – vzdálenost dolního vzorku od bodu  $O$

## 4.2 Generování obrázků

Generátor byl realizován v softwaru MATLAB. Je uložen jako funkce *generate\_moire*. Protože se nejedná o reálný systém, jednotky mohou být libovolné (například milimetry, centimetry ,atd.). Vstupy funkce jsou následující:

$H$  – vzdálenost kamery od geometrického středu přípravku  $O$   
 $x$  – velikost obrazové roviny ve směru  $x$  v pixelech (počet sloupců obrazu)  
 $y$  – velikost obrazové roviny ve směru  $y$  v pixelech (počet řádků obrazu)  
 $f$  – fokusová vzdálenost (vzdálenost mezi body  $O$  a  $C$ )  
 $sx$  –  $x$ -ová souřadnice středu obrazové roviny (poloha bodu  $P$ )  
 $sy$  –  $y$ -ová souřadnice středu obrazové roviny (poloha bodu  $P$ )  
 $kx$  – posun kamery podél osy  $x$   
 $ky$  – posun kamery podél osy  $y$   
 $kz$  – posun kamery podél osy  $z$   
 $roztech$  – perioda horního vzoru  
 $roztecd$  – perioda dolního vzoru  
 $posun$  – posun horního vzoru vůči dolnímu kolmo na směr pruhů  
 $uhelx$  – rotace horního vzoru kolem osy  $X$   
 $uhely$  – rotace horního vzoru kolem osy  $Y$   
 $uhelz$  – rotace horního vzoru kolem osy  $Z$   
 $vzdalenost$  – vzdálenost horního vzoru od bodu  $O$

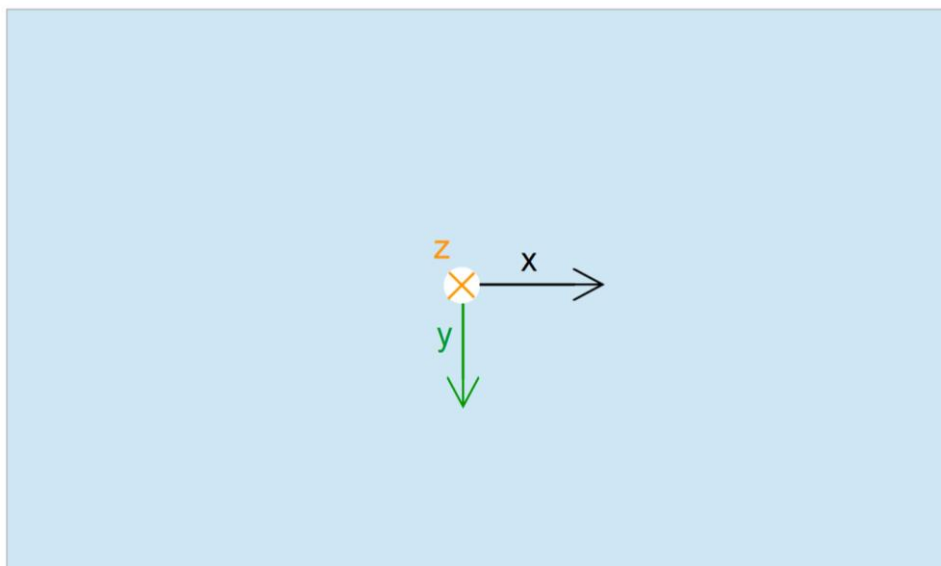
Výstupy funkce jsou 3 obrázky:

*orhorni* – průmět horního vzoru na kameře  
*obrdolni* – průmět dolního vzoru na kameře  
*obrvysl* – průmět obou vzorů na kameře (tj. kombinace předchozích 2)

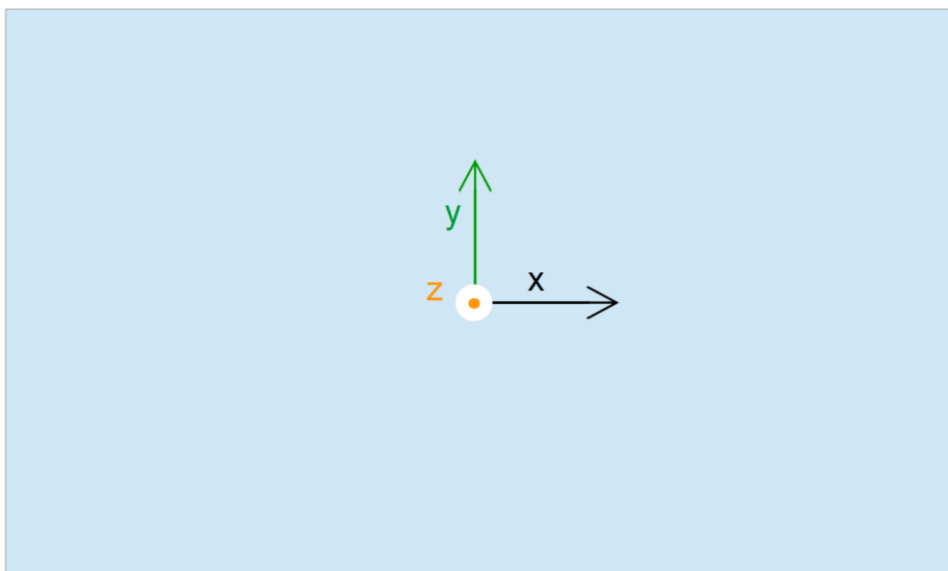
Výsledné obrázky jsou binární, tj. ideální Ronchiův vzor s vysokým kontrastem a se skokovou změnou mezi světlými a tmavými pruhy.

Vzdálenost mezi rovinami, v které dané vzory leží za předpokladu, že vzorky nejsou otočené kolem osy  $X$  a  $Y$  je  $vzdalenost$ . To znamená, že vzdálenost horního vzoru od kamery je  $H$  a vzdálenost dolního vzoru od kamery je  $H + vzdalenost$ . Umístění bodu  $O$  lze zvolit v programu; Tedy je možné umístit střední bod do jiné hloubky. Ve všech případech bylo použito umístění středu v horní rovině.

Osa, kolem které lze vzor otáčet, prochází bodem  $O$ . Rotace kolem osy probíhá v kladném směru z pohledu pravostranného souřadnicového systému (viz Obrázek 17). Posun kamery probíhá podle šipek na Obrázek 15; rovněž se jedná o pravostranný souřadnicový systém, ve kterém je orientace  $Z$ -ové a  $Y$ -ové osy opačná (aby se zvýšení vzdálenosti kamery  $H$  a posun vzorů *vzdálenost* v prostoru se přičítali).



**Obrázek 17:** Osy, kolem které probíhá otáčení dle úhlů  $uhelx$ ,  $uhely$ ,  $uhelz$



**Obrázek 18:** Osy, podél které se kamera posouvá dle parametrů  $kx$ ,  $ky$ ,  $kz$

Počátek WCS je v bodě  $O$ . Rotaci lze realizovat dvěma způsoby: buď je rotován pouze jeden ze vzorů, nebo oba zároveň (dle stejných úhlů).

Chyba vygenerovaných snímků je  $\pm 0,5$  pixelu kvůli zaokrouhlování necelých čísel na celé. Dílčí popis funkčnosti se nachází v komentáři kódu.

Zorný úhel kamery je definován známým vztahem:

$$FOV = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{d}{2f} \quad (25)$$

Pro různé velikosti výstupního obrazu a pro různé ohniskové vzdálenosti a velikosti senzoru nabývá zorný úhel různé hodnoty. Senzor může mít různou šířku a délku, pak se rozlišují vertikální a horizontální zorné úhly.

## 5. Návrh a testování algoritmů

Tato kapitola popisuje návrh a funkčnost jednotlivých algoritmů pro detekci vzájemné polohy moaré vzorů, které jsou generovány moaré interferencí. Algoritmy slouží pro určení vzájemné polohy dvojice vzorů; slouží pro určení jejich vzájemné vzdálenosti a úhlu natočení. V jednotlivých podkapitolách jsou řešena měření různých typů pohybu.

### 5.1 Určení periody moaré interferencí z obrazu

Tento specifický algoritmus slouží pouze pro kontrolu základního vzorce moaré interferencí (16) a pro odvození algoritmů pro zpracování obrazu, které budou použity i v dalších algoritmech. Hlavním cílem je určit periodu moaré interferencí  $p_m$ .

Podmínky testování:

- Vzdálenost vzorů od kamery: libovolná
- Velikost výsledného obrazu: libovolná
- Ohnisková vzdálenost: libovolná kladná, menší než vzdálenost kamery od geometrického středu přípravku.
- Vzory nejsou vzájemně posunuté
- Vzory nejsou otočené
- Vzájemná vzdálenost vzorů je nulová. Tzn. že vzdálenost obou vzorů od kamery je  $H$
- Rozteč dolního a horního vzoru je v poměru 110:100 tzn.  $p_d = 1,1p_h$

Ačkoliv vzdálenost vzorů od kamery i rozteč vzorů může být teoreticky libovolná, vzhledem k diskretizaci signálu na pixely je omezena na vzdálenost, kdy šířka čar (po zaokrouhlování na celé číslo) dosáhne šířky jednoho pixelu ve finálním obraze. Perioda musí splnit nerovnost:

$$1 \leq \left\lceil f \frac{\text{roztech}/2}{H} \right\rceil \quad (26)$$
$$\text{roztech} > 2 \frac{H}{f}$$

V rovnici byla použita rozteč horního vzoru, protože dle zvoleného poměru bude mít menší rozteč, z čehož plyne, že dolní vzor tuto podmínku splní automaticky;



obsahuje o 10 % širší pruhy, které při šířkách větších než pět pixelů budou vždy o jeden pixel širší. Pro testovací obrázky algoritmu je tato podmínka splněna. Snímky měly šířku 600 pixelů a kamera měla ohniskovou vzdálenost 100 mm. Jak je ze vzorce 16 patrné, moaré interference vznikne pouze v případě, kdy se rozteč horního a dolního vzoru liší a jeho perioda závisí na poměru  $p_m = |(p_d \cdot p_h)/(p_d - p_h)|$ . Ze vzorce je vidět, že v případě podmínky  $p_d > 1 \wedge p_h > 1$ , bude perioda samotných moaré záznejů delší než perioda jednotlivých vzorů. Z rovnice (26) lze vypočítat minimální rozteč horního vzoru, která při daných podmínkách může být  $p_{h_{min}} = 13 \text{ mm}$ . Protože rozteč horního a dolního vzoru byla zvolena v poměru 100:110, rozteč dolního vzoru bude 14 mm.

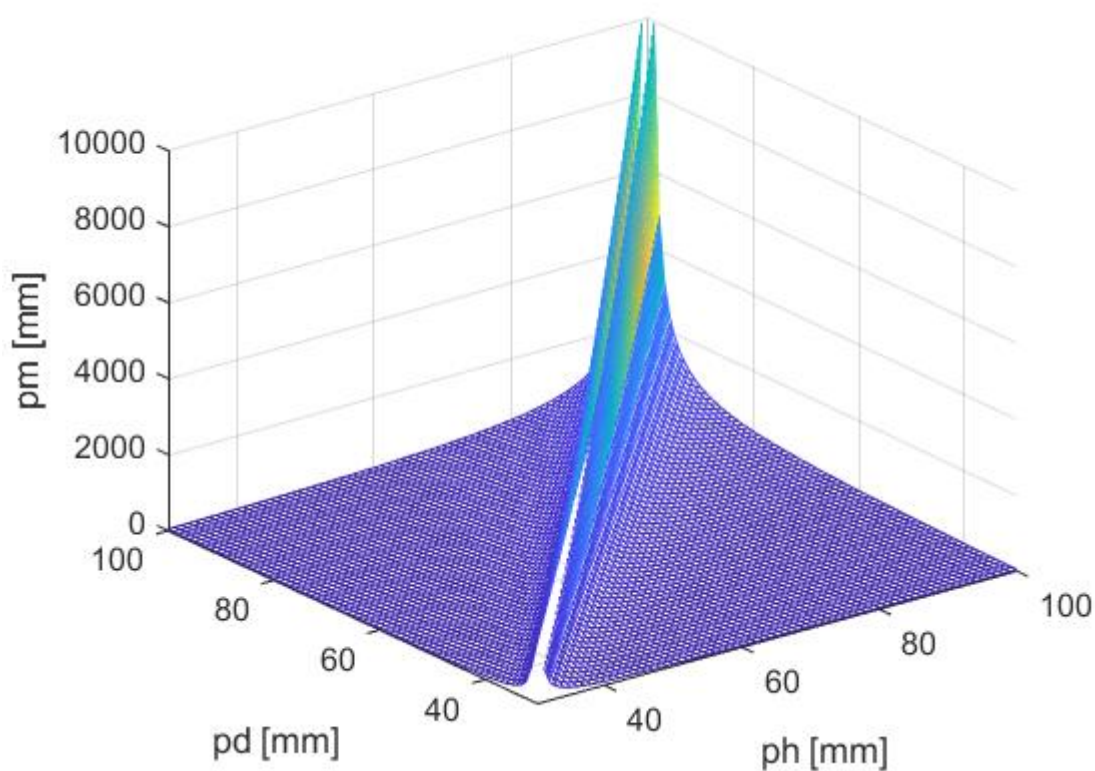
Samozřejmě musí být uvažován i zorný úhel kamery. Proto je vhodné zvolit kombinaci period, jejichž hodnoty vytváří moaré záznejů a jejichž periodu lze snímat (není tedy delší než šířka obrázku). Ze vzorce (16) a z Graf 2 je patrné, že perioda moaré interferencí hyperbolicky klesá s velikostí rozdílu  $(p_d - p_h)$  a s rostoucí velikostí  $p_d$  a  $p_h$  lineárně narůstá. Pokud pro poměr period platí, že  $p_d = 1,1p_h$ , je možné ze vzorce (16) odvodit vztah:

$$p_m = \frac{1,1p_h \cdot p_h}{1,1p_h - p_h} = 11p_h \quad (27)$$

Maximální rozteč  $p_{h_{max}}$ , která generuje  $p_m = so$  (šířka obrazu) v obrazové rovině je potom:

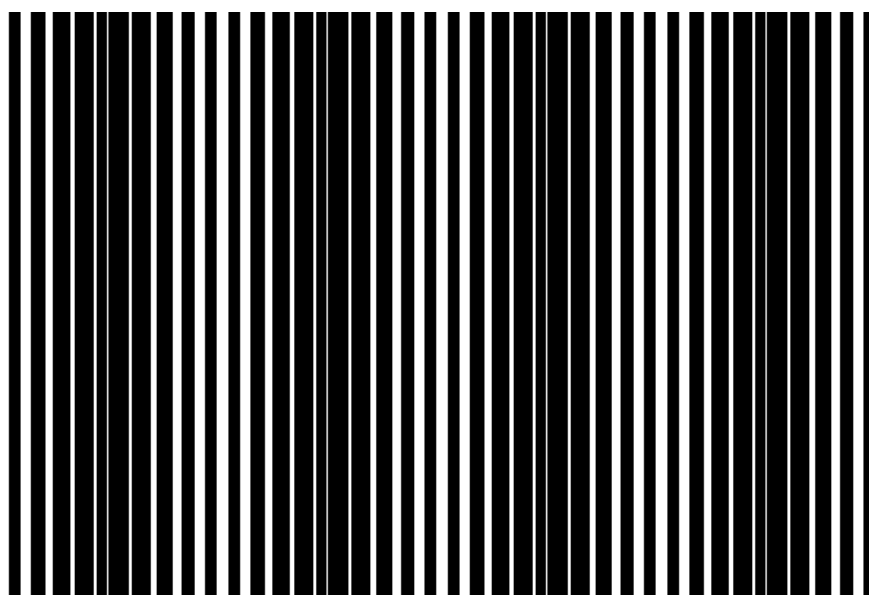
$$p_{h_{max}} = \left\lfloor \frac{so \cdot H}{11 \cdot f} \right\rfloor \quad (28)$$

Pro obrázek se šířkou 600 pixelů je  $p_{h_{max}} = 327 \text{ mm}$ .



**Graf 2: Závislost periody  $p_m$  na rozteče vzorů ( $p_m$  a  $p_m$ )**

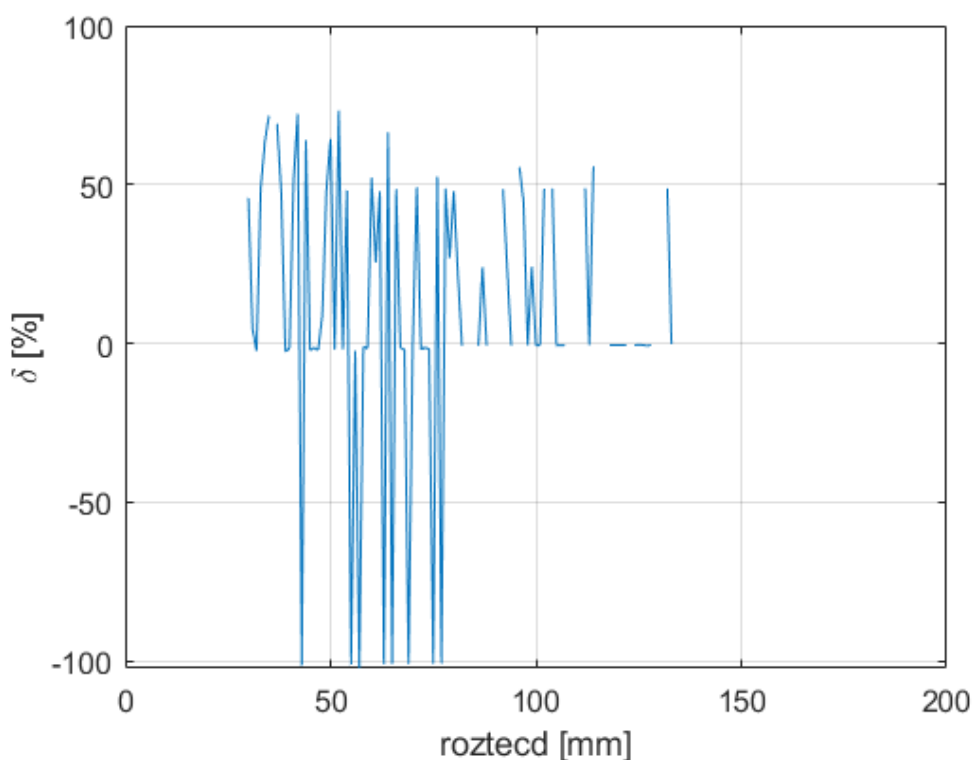
Z praktických důvodů jsou uvažovány pouze případy, které tyto podmínky pro toto měření splňují. Výsledný obraz může vypadat podobně jako Obrázek 19.



**Obrázek 19: Obrázek vygenerovaný pomocí funkce *generate\_moire***

### 5.1.1 Metoda šířka pruhů

Jelikož výsledné obrázky jsou získány generátorem ideálních obrázků a nikoliv reálnou kamerou, je výsledný snímek binární. Hledání maxim by bylo možné pouhým hledáním různě dlouhých sekvencí černé a bílé. Pro tento účel byla vytvořena funkce *sequence*, která hledá sekvence bílých a černých sérií a uloží jejich délku. Vstupem do funkce je vektor obsahující dvě různé hodnoty. Výstupem jsou 3 vektory: jeden obsahuje šířky všech bílých pruhů, druhý obsahuje šířky všech černých pruhů a třetí vektor, který obsahuje šířky všech pruhů v pořadí, odpovídající pořadí pruhů v prostoru. Moaré perioda je určena ze vzdálenosti nejširších černých pruhů. Výpočet by byl možný i pomocí vzdálenosti nejširších bílých pruhů. Pro testování této metody byly zvoleny rozteče z rozsahu  $\langle 13; 327 \rangle$  mm, Pro určení periody moaré interference byl použit pouze jeden řádek výsledného obrazu, poněvadž každý řádek je stejný.



**Graf 3: Relativní chyba metody „šířka pruhů“ na závislosti rozteče vzorů**

I když se tato metoda jeví jako nejjednodušší způsob, jak určit periodu moaré interferencí, má své zásadní chyby. V případě Obrázek 19 by tuto metodu bylo možné použít, neboť ze vzdálenosti mezi nejširšími černými pruhy lze určit  $p_m$ . Z Graf 3 je

patrné, že tato metoda má ve většině případů obrovské chyby, které jsou převážně způsobené tím, že ne ve všech případech jsou jednotlivé pruhy stejně široké (zaokrouhlování necelého čísla na celé číslo). Tato metoda je prakticky nepoužitelná, ale vytvořená funkce *sequence* byla použita v rámci jiných algoritmů.

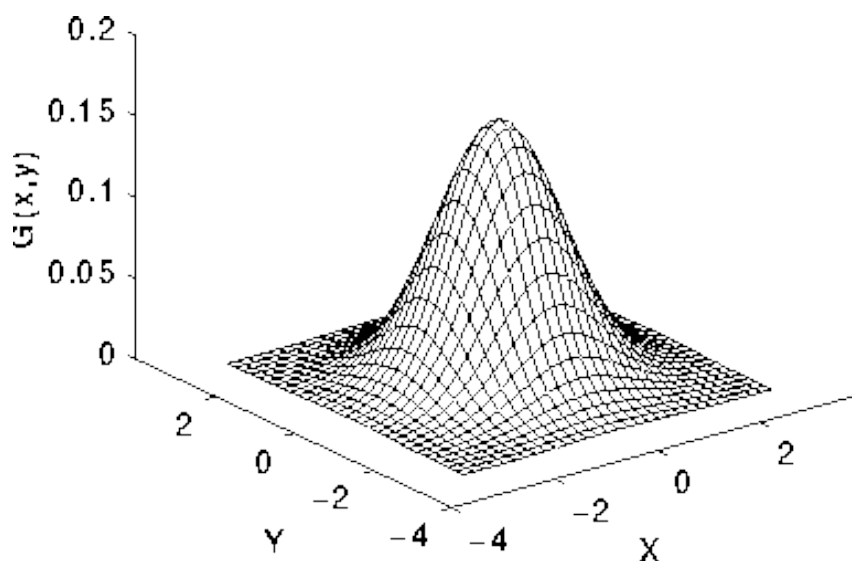
### 5.1.2 Metoda založena na rozostření obrázku

Tato metoda byla navržena jako robustnější způsob určení periody moaré čar, která může být použita i v neideálních případech, kde už budou vzory nasnímané reálnou kamerou, nebudou ležet v jedné rovině nebo budou vzájemně otočené. Hlavní myšlenkou této metody je rozostřit výsledný obraz a na místech, kde vznikají černé a bílé (tentokrát už nehomogenní) oblasti, určit polohu lokálních maxim nebo minim. Perioda moaré interference je potom vzdálenost těchto lokálních maxim či minim. Metodu lze rozdělit na dva kroky: rozostření obrazu a nalezení lokálních maxim, pomocí kterých lze dopočítat periodu interferenčních čar.

Rozostření obrazu přeruší binární povahu synteticky vytvořeného původního obrazu. Výsledný obraz bude mít více jasových hodnot, což umožňuje podrobnější analýzu signálu. Pro tento účel byla použita Gaussova filtrace. Gaussův filtr je typ filtru, jehož impulzní charakteristika je aproximace Gaussovy funkce. Tento filtr je považován za ideální filtr v časové či prostorové doméně (stejně jako sinc filtr ve frekvenční doméně). [15] Tento filtr při filtraci obrazu slouží především pro odstranění šumu. Přenos filtru v dvourozměrném prostoru:

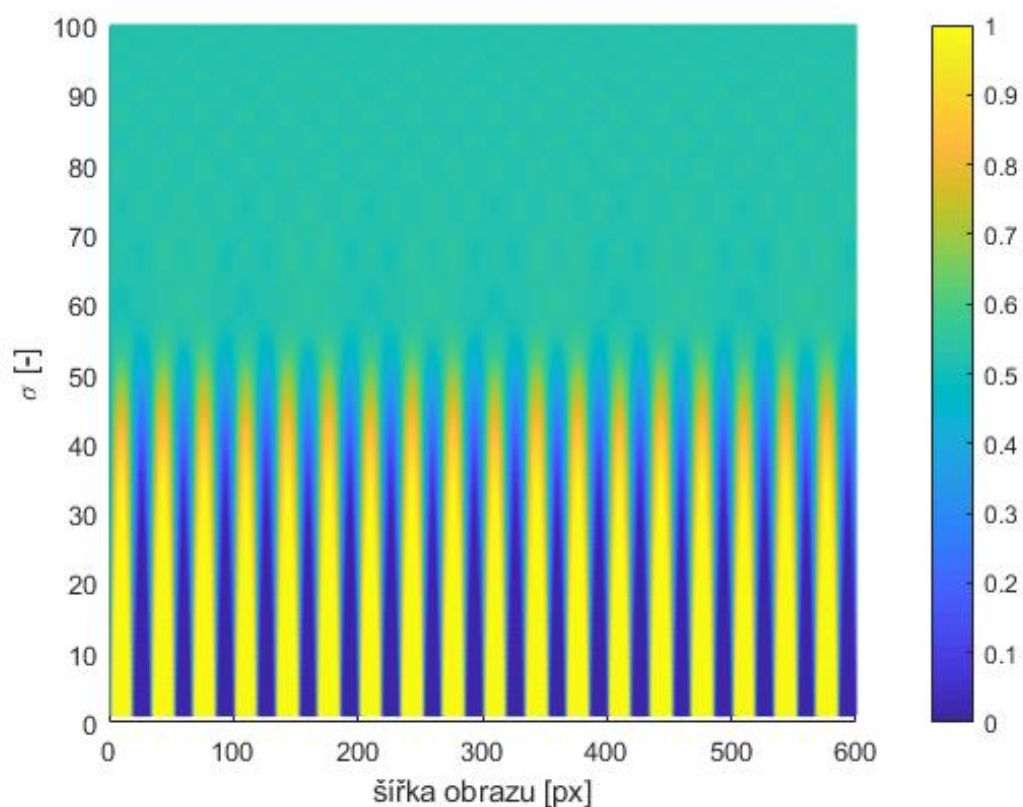
$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

Kde  $x$  a  $y$  jsou směry v příslušných osách dvourozměrného signálu. Digitální implementace tohoto filtru je vždy ořezaná, neboť teoreticky by bylo potřebné mít nekonečně velkou velikost okna, což je prakticky neproveditelné. Filtr je separovatelný; tato vlastnost výrazně redukuje počet matematických operací pro výpočet odezvy. [16]



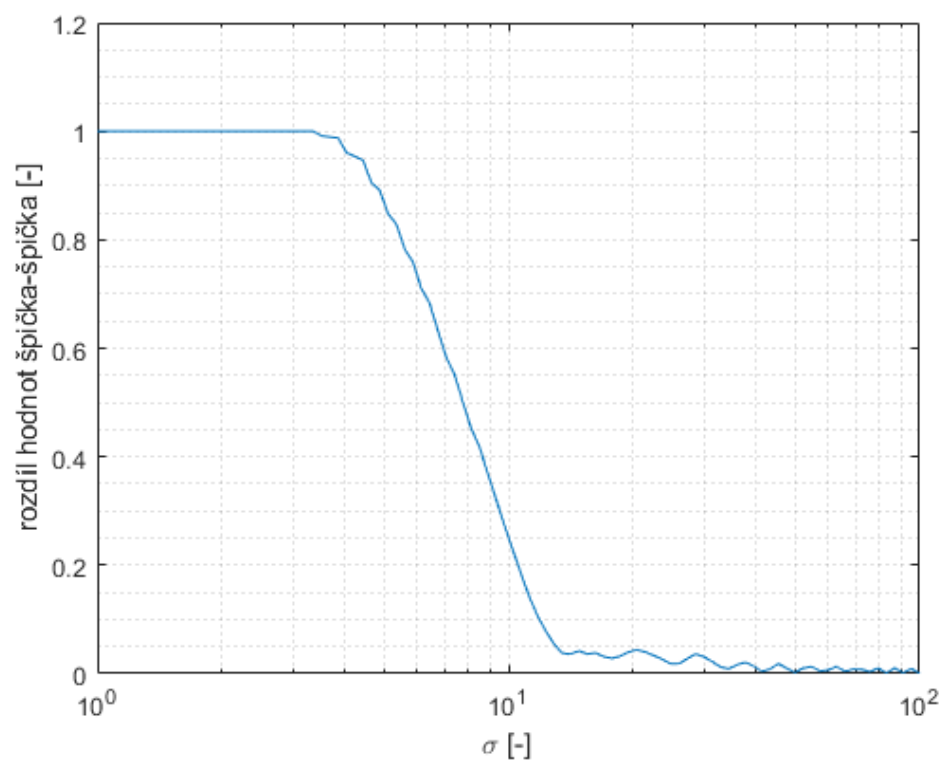
**Graf 4: Gaussovo rozložení s mediánem [0;0] a  $\sigma=1$  [17]**

Gaussova filtrace v softwaru MATLAB má dva základní parametry pro nastavení: typ paddingů (rozšíření obrázku, aby filtr mohl být naložen nad každou pozici původního obrazu) a rozptyl  $\sigma$  s kterým úzce souvisí velikost filtru. [14] Jelikož pruhy na obrázku jsou svislé, tak nejlepší typ paddingu pro daný úkol je symetrické rozšíření. To rozšíří obraz na krajích zrcadlenou kopií. Zprvu bylo okno filtru určeno dynamicky, poněvadž při analýze pouze výsledného obrázku není známa přibližná perioda moaré interference. Cílem bylo určit kernel filtru bez hlubších znalostí o systému (bez výšky kamery, ohniskové vzdálenosti apod.) čistě z výsledného obrázku. V cyklu byl testován Gaussův filtr s postupně zvětšujícím se oknem. Práh byl zvolen z hodnot rozdílu maximální a minimální hodnoty obrázku experimentálně.

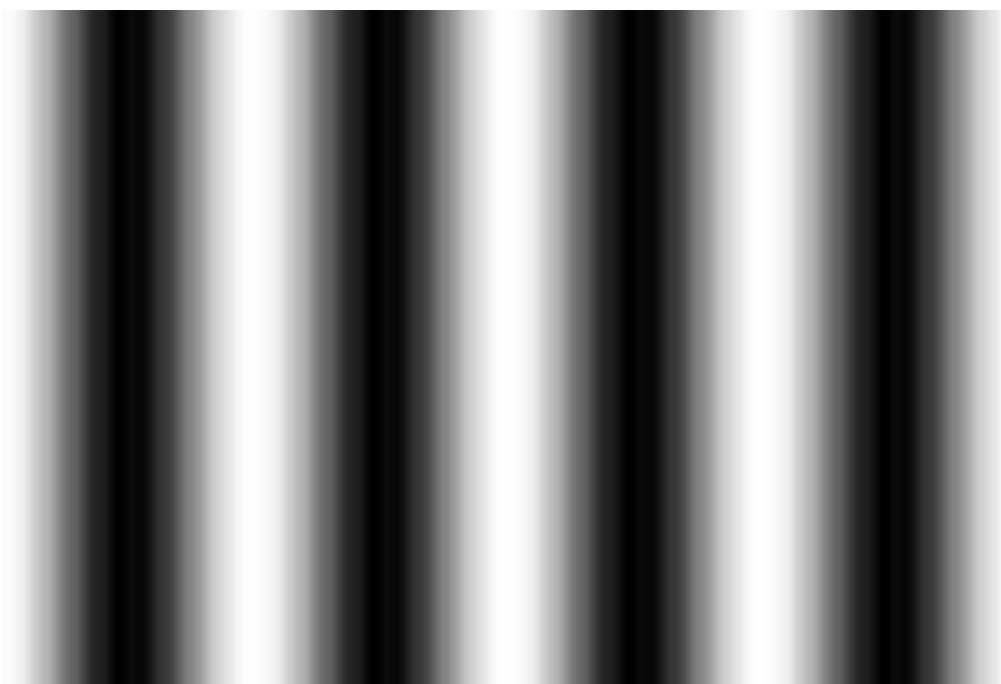


**Graf 5: Závislost rozdílů maximálních a minimálních hodnot v rozostřeném obrazu s rostoucím sigma (modrá barva představuje nízké a žlutá barva vysoké jasové hodnoty)**

Při opakovaném experimentu se jako nejlepší  $\sigma$  ukázala osmina rozteče vzoru. Nastavený práh je naladěný na vhodné rozostření černých pruhů (minima), které jsou důležité pro nalezení minima v signálu; protože ve většině případů jsou zkoumané/měřené právě tyto minima. Podrobnější popis testování je v komentářích kódu.



**Graf 6: Rozdíl minima a maxima hodnot obrázku po rozostření s Gaussovým filtrem s různými parametry  $\sigma$  (rozteč vzoru je 200 mm)**

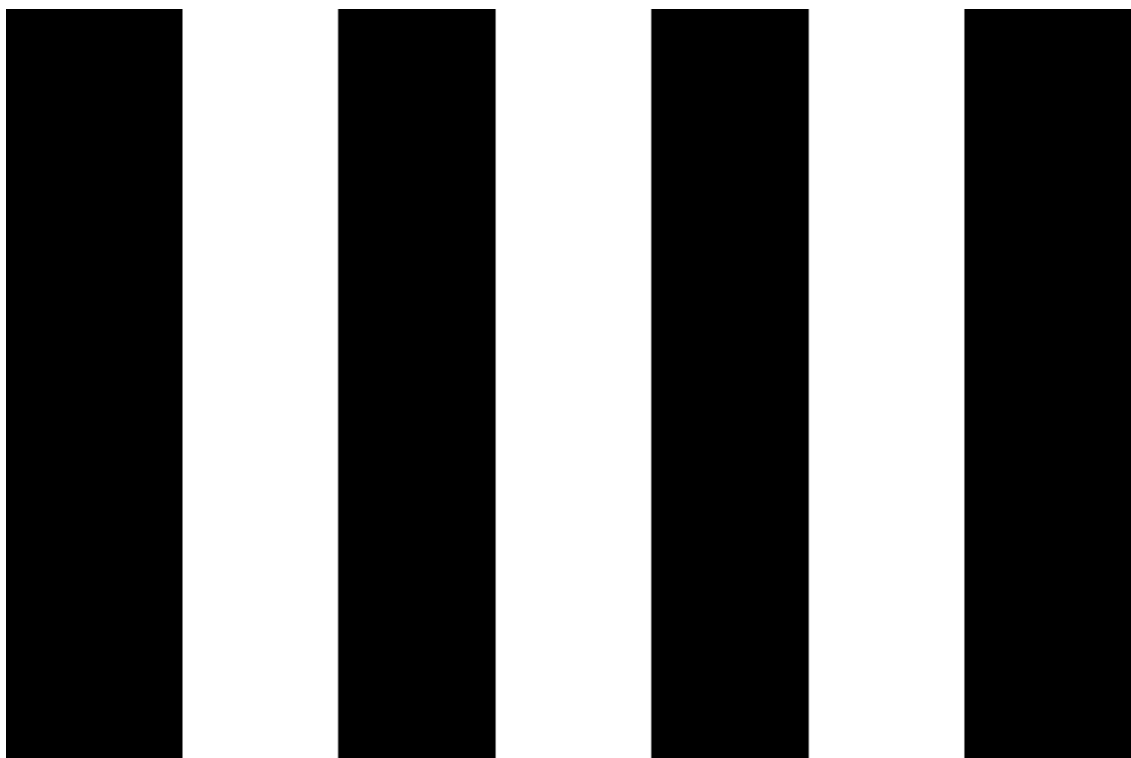


**Obrázek 20: Příklad rozostření obrázku s Gaussův filtrem, jehož rozptyl byl nastaven podle výše popsané metody**

Dalším krokem při určení periody moaré záznejů je najít jednotlivá maxima a minima v obraze. To bylo dosaženo normalizací získaného obrazu (na intervalu  $\langle -1; 1 \rangle$ ) a nalezením lokálních maxim této oblasti. Pro tento účel byla použita funkce *findpeaks* [12], jejíž vstupem byl řádek z rozostřeného obrazu a to proto, že každý řádek má stejné jasové hodnoty. Dále byly nastaveny parametry minimální vzdálenosti a minimální výšky maxim, takovým způsobem, že nejdříve byl normalizovaný obraz podle potřeby invertován (z minima se stanou maxima a obráceně). Minimální vzdálenost maxim byla nastavena pomocí funkce *sequence*. Binarizace byla provedena nejdřív pomocí *imbinarize* (která používá Otsuovu metodu [21]), ale následně kvůli urychlení binarizace byl normalizovaný obrázek prahován jednoduše s prahem 0. Výstupní obrazy jednotlivých metod mají sice různou šířku jednotlivých pruhů (černých a bílých), ale průměrná šířka všech pruhů (bílých i černých) zůstává téměř stejná pro obě metody. Pro určení přibližné periody  $p_m$  byla použita funkce *trimmean*, která spočítá průměr z dat tak, že nejprve seřadí hodnoty podle velikosti a krajní body vynechá z výpočtu. [11].

Prahování s prahem 0 má další výhodu v případě, kdy je detekováno málo čar, kdy šířka krajních čar by mohla způsobit velkou chybu při výpočtu průměru. V tomto případě minimální vzdálenost maxim je určena mediánem nalezených homogenních sekvencí a medián pruhu prahován nulou odpovídá víc přibližné periodě  $p_m$

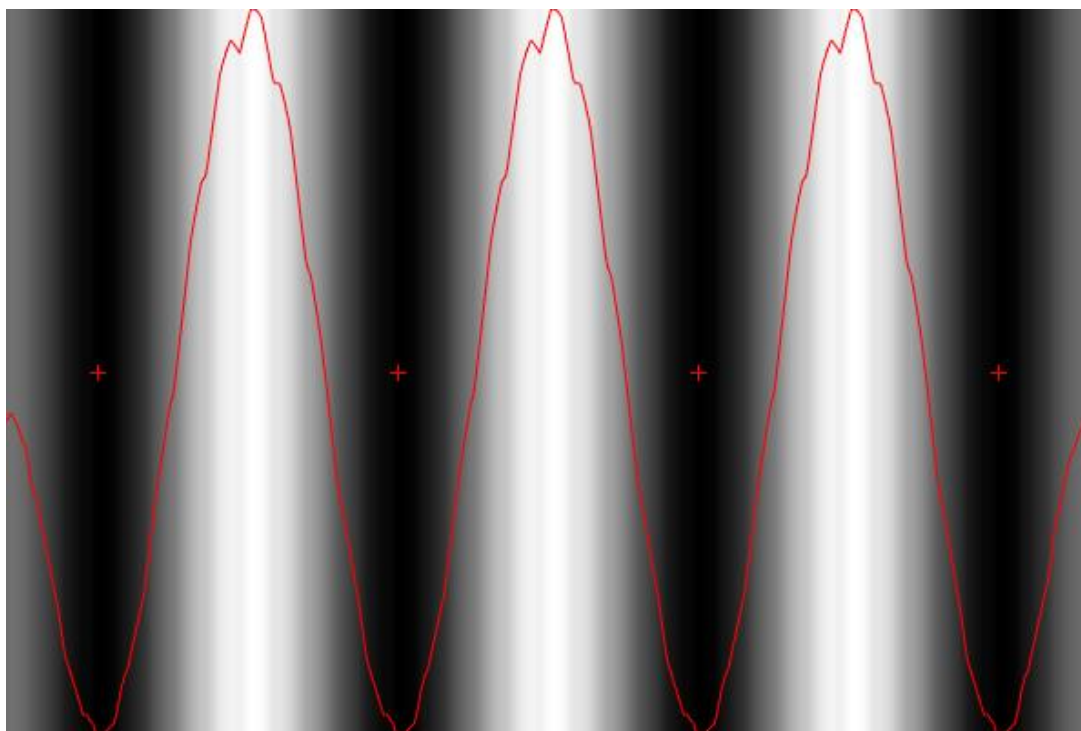




**Obrázek 21: Obráz binarizovaný prahem 0**

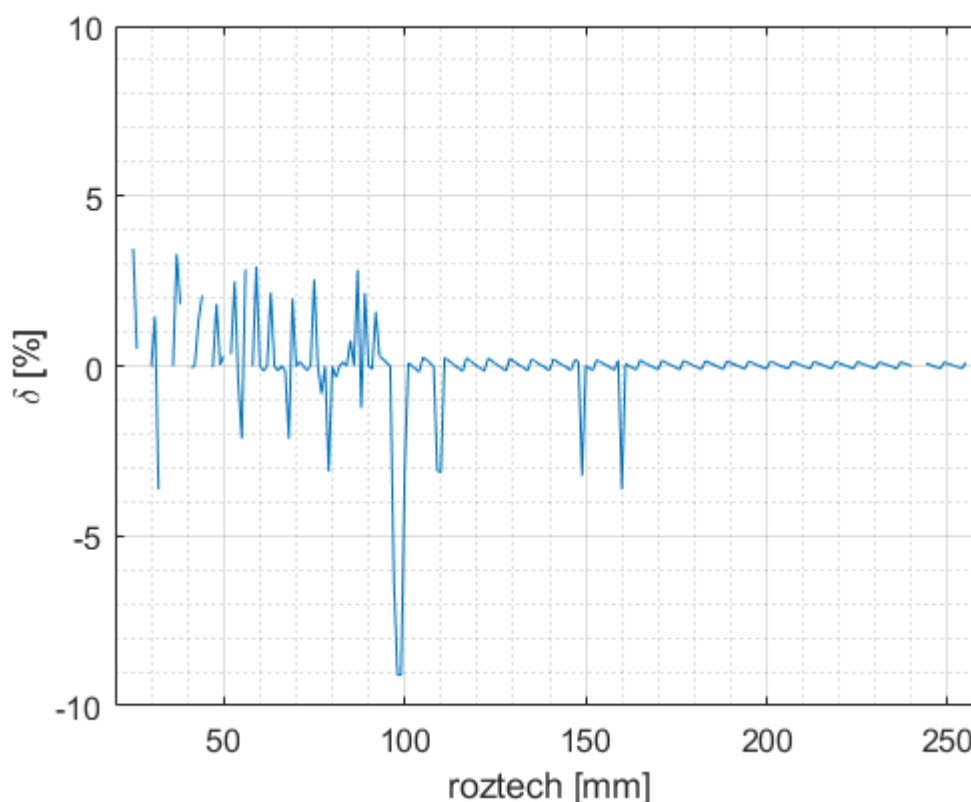


**Obrázek 22: Obráz binarizovaný pomocí Otsuovi metody**



**Obrázek 23: Normalizovaný rozostřený obrázek s průběhem jasových hodnot jednoho řádku a míst, kde se byly nalezeny minima**

Tato metoda vedla k výraznému zlepšení estimace periody moaré vzorů. Proto byla použita i v dalších algoritmech, kde je potřebné najít lokální maxima či minima. Při testování tohoto algoritmu byly použity stejné podmínky jako v předchozí metodě. Při měření chyby byly vynechány všechny případy, kdy kvůli zaokrouhlování na celá čísla by pruhy horního a dolního vzoru měly stejnou rozteč a hodnoty. Dále byly vynechány případy, kdy lokální minima jsou na krajích obrazu, poněvadž v tomto případě by mohly být detekována falešná maxima; část filtru pro rozostření by se nacházela mimo obraz a v důsledku použití paddingu by mohla vzniknout falešná maxima.



**Graf 7: Relativní chyba určení periody moaré z rozostřeného obrázku na závislosti rozteče vzorů**

Na Graf 7 místo původně určeného intervalu  $\langle 13; 327 \rangle$  mm je zobrazena pouze část, která vyhovovala podmínkám popsaných výše.

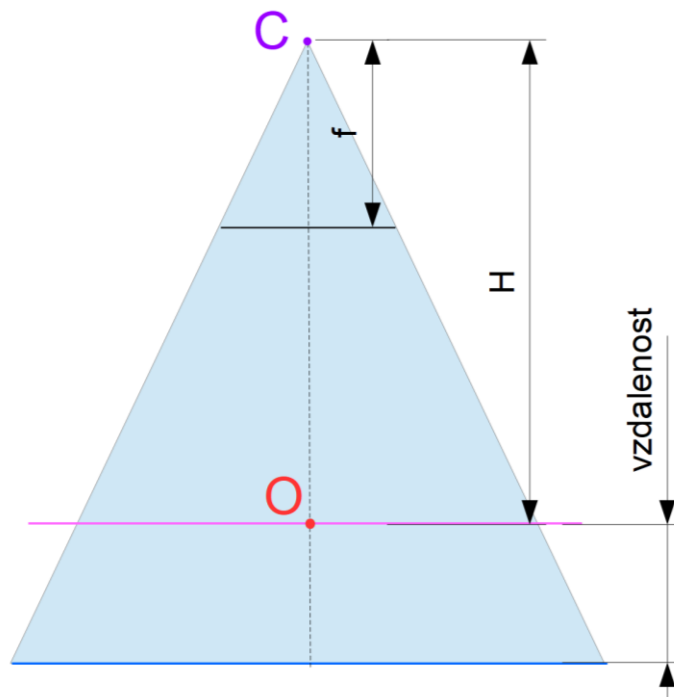
Pro normalizaci obrazu a následné nalezení maxim je lepší vzít jen část obrazu, která nebyla zatížena chybou filtru, jehož část se nacházela mimo obraz. Tím se velikost obrazu zmenší, což vede ke ztrátě informací, ale to lze kompenzovat, protože perioda světlých a tmavých pruhů je teoreticky stejná. Metodu lze vylepšit tak, že  $p_m$  bude určena jako dvojnásobek vzdálenosti nalezených maxim a minim. Tato upravená varianta algoritmu vedla ke zlepšení odhadu moaré periody a co je důležitější, umožnila měření moaré periody na větším rozsahu. V případě, že je v obraze pouze jedno minimum a jedno maximum, lze také určit periodu moaré záznejů jako dvojnásobek půlperiody. Kód pro testování těchto algoritmů se nachází v souboru *zakladni\_mereni.m*.

## 5.2 Určení vzdálenosti vzorů

V předchozí podkapitole byla řešena čistě měření periody moaré interferencí při známé rozteči vzorů a vzdálenosti vzorů od kamery. Tato podkapitola se zabývá využitím předem navrhnuté metody v praxi (mnohem častěji vyskytující se situací). Měření vzdálenosti vzorů spočívá v tom, že při známé vzdálenosti jednoho vzoru od kamery a při známých periodách vzorů lze určit vzdálenost jednoho vzoru od druhého a tím i od kamery. Z hlediska kamery se jedná o pohyb ve směru optické osy. Moaré interference vznikají v případě, kdy se rozteč vzorů liší. To lze v rovině dosáhnout pouze jediným způsobem a to tak, že rozteč vzorů bude odlišná. V prostoru mohou mít stejně velké objekty jinou velikost na průmětně podle jejich vzdálenosti od kamery. Tímto způsobem lze dosáhnout toho, že mřížky, které mají sice stejnou periodu, ale jinou vzdálenost od kamery, vytváří moaré efekt.

Podmínky testování:

- Vzdálenost horního vzoru od kamery: 600 mm
- Velikost výsledného obrazu: 600x400 pixelů
- Ohnisková vzdálenost: 100 mm
- Vzory nejsou vzájemně posunuté
- Vzory nejsou vzájemně otočené
- Rozteč vzorů je konstantních 100 mm



**Obrázek 24: Schéma pracoviště při experimentu určení vzdálenosti vzoru (vzhled z osy Y)**

Na Obrázek 24 je zobrazena vzájemná poloha vzorů (růžová modrá čára) a průmětny (černá čára). Z obrázku plyne, že průmět periody vzorů ( $PH$  a  $PD$ ) na průmětně bude mít velikost:

$$PH = f \frac{\text{roztech}}{H} \quad (30)$$

$$PD = f \frac{\text{roztecd}}{H + \text{vzdálenost}} \quad (31)$$

Dosazením vzorce (31) a (30) do základního vzorce (16) a po vyjádření vzdálenosti lze odvodit vztah:

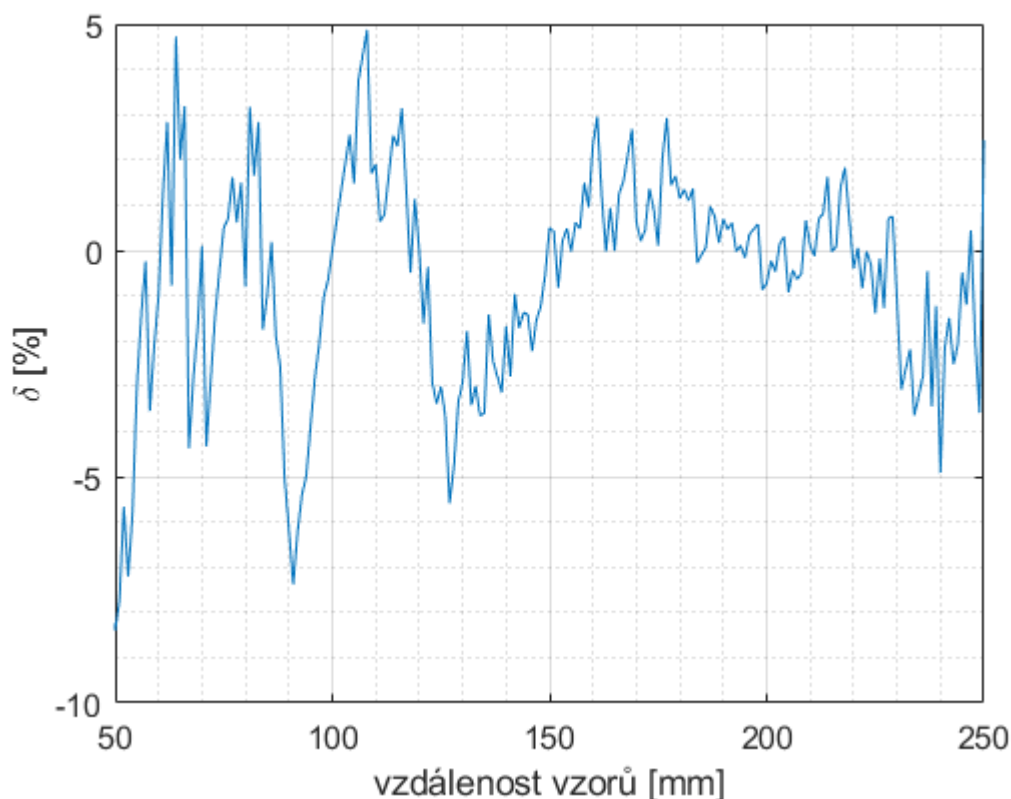
$$\text{vzdálenost} = f \frac{\text{roztecd}}{PM} + H \left( \frac{\text{roztecd}}{\text{roztech}} - 1 \right) \quad (32)$$

Za předpokladu, že ve skutečnosti  $\text{roztecd} = \text{roztech}$ , tak člen se závorkou vypadne a zůstává vztah:

$$\text{vzdálenost} = f \frac{\text{roztec}}{PM} \quad (33)$$

S použitím metody vysvětlené v předchozí kapitole je měřena perioda moaré interferencí a vzdálenost je vypočítána z výše uvedeného vzorce. Samozřejmě tato

metoda má také své hranice. Je třeba kontrolovat, jestli se perioda moaré pruhů vejde do obrázku. Dále je zapotřebí sledovat, zda se naměřená moaré perioda náhodou nerovná periodě horního vzoru (který zůstává při měření neposunutý). To se projevuje ve velkých vzdálenostech vzorů, kdy se průmět dolního vzoru promítá na tak úzké čáry na průmětně, že algoritmus vytvořený pro detekování moaré interferencí bude měřit pouze periodu horního vzoru a považovat jeho periodu za periodu moaré záznějů.

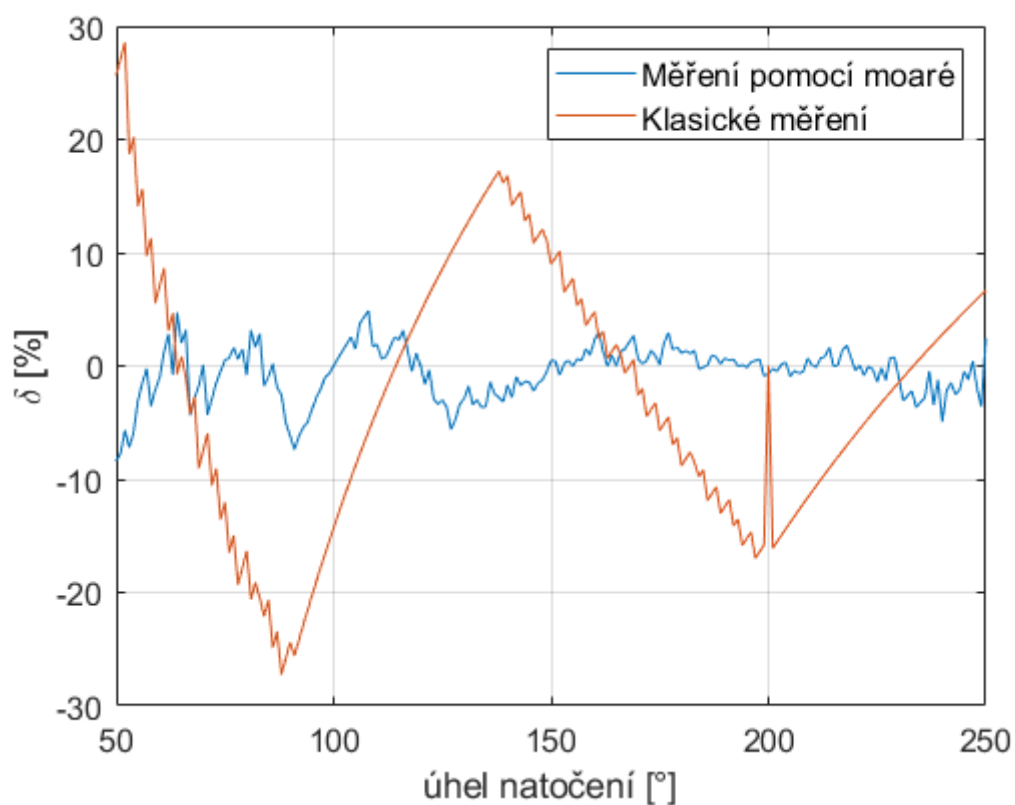


**Graf 8: Relativní chyba metody určení vzdálenosti**

Při větších vzdálenostech (nad 250 mm) už byl dolní vzor tak daleko v prostoru od horního, že v rozostřeném obrázku byla detekována pouze perioda horního vzoru. Do této chvíle byla relativní chyba mezi  $\langle -10; 5 \rangle$  %. Spolehlivý interval, ve kterém je vzdálenost možné určit s relativně velkou přesností je  $\langle 150; 250 \rangle$  mm. Okomentovaný kód této podkapitoly se nachází v souboru *main\_vzd.m*.

Výsledky tohoto algoritmu byly porovnány s výsledky přímé metody měření; tj. podle šířky světlých a černých pruhů dolního vzoru byla také vypočítána teoretická vzdálenost vzoru. Pro tento účel byl použit pouze obrázek dolního vzoru a funkce *sequence* pro měření šířky čar; odhadovaná vzdálenost byla vypočítána dle

trojúhelníkové podobnosti. Závislost relativní chyby na vzdálenosti obou metod je zobrazena v Graf 9. Je vidět, že bylo dosaženo sub-pixelového měření, poněvadž metoda používající moaré periody dosáhla ve všech případech menší chyby. Podrobnější výsledky jsou v souboru *provvzd.mat*, obsahující skutečné hodnoty vzdálenosti a odhadované hodnoty vzdálenosti obou metod.



**Graf 9: Porovnání relativní chyby metody určení vzdálenosti vzorů pomocí moaré záznejů a z původního obrázku**

## 5.3 Otočení kolem osy Z

V tomto případě byly uvažovány dva různé případy, ve kterých je rozteč vzorů buď různá, nebo stejná. Vzory v obou případech leží v jedné rovině paralelně na rovinu průmětny. Jeden ze vzorů byl otočen kolem osy Z, přičemž druhý vzor je v základní pozici (není otočen). Cílem prvních čtyřech variant (viz 5.3.1 – 5.3.4) je detekce sklonu moaré interferencí, z čehož lze určit vzájemný náklon vzorů. Z Graf 1 je patrné, že v případě, kdy rozteč obou vzorů je stejná, je závislost úhlu moaré čar a úhlu natočení horního vzoru sice lineární, ale sklon přímky je velmi mírný; velká změna v otočení horního vzoru způsobí malou změnu v otočení moaré čar. Proto u prvních čtyřech variant měření byl použitý poměr rozteče 90:100 a jen malé úhly natočení. Za předpokladu, že jeden ze vzorů při měření zůstává nenatočený, se rovnice (21) zjednoduší na:

$$\tan \alpha_r = \left(1 - \frac{p_r}{p_b}\right) \tan \alpha_m \quad (34)$$

Při známých roztečích dolního a horního vzoru a měřeného úhlu  $\alpha_m$  lze jednoduše vypočítat natočení druhého vzoru  $\alpha_r = \tan^{-1} \left[ \left(1 - \frac{p_r}{p_b}\right) \tan \alpha_m \right]$ . V následujících podkapitolách, ve kterých se rozteč vzorů se liší, byly snímky pořízeny za podmínek:

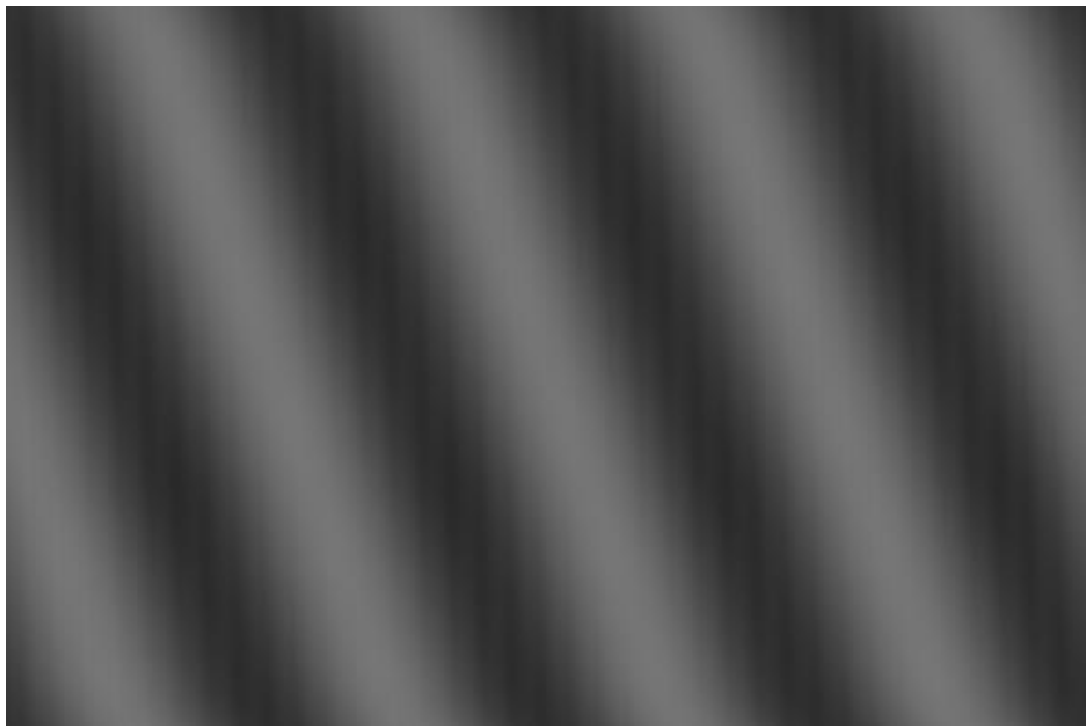
- Vzdálenost vzorů od kamery: 600 mm
- Velikost výsledného obrazu: 600x400 pixelů
- Ohnisková vzdálenost: 100 mm
- Vzory nejsou vzájemně posunuté
- Vzdálenost vzorů je nulová. Tzn. že vzdálenost obou vzorů od kamery je  $H$
- Rozteč horního vzoru: 90 mm
- Rozteč dolního vzoru: 100 mm

Metody pro zjištění úhlu natočení vzorů o různých roztečích jsou především založené na zjištění úhlu natočení moaré čar, nikoli na zjištění periody moaré vzorů.



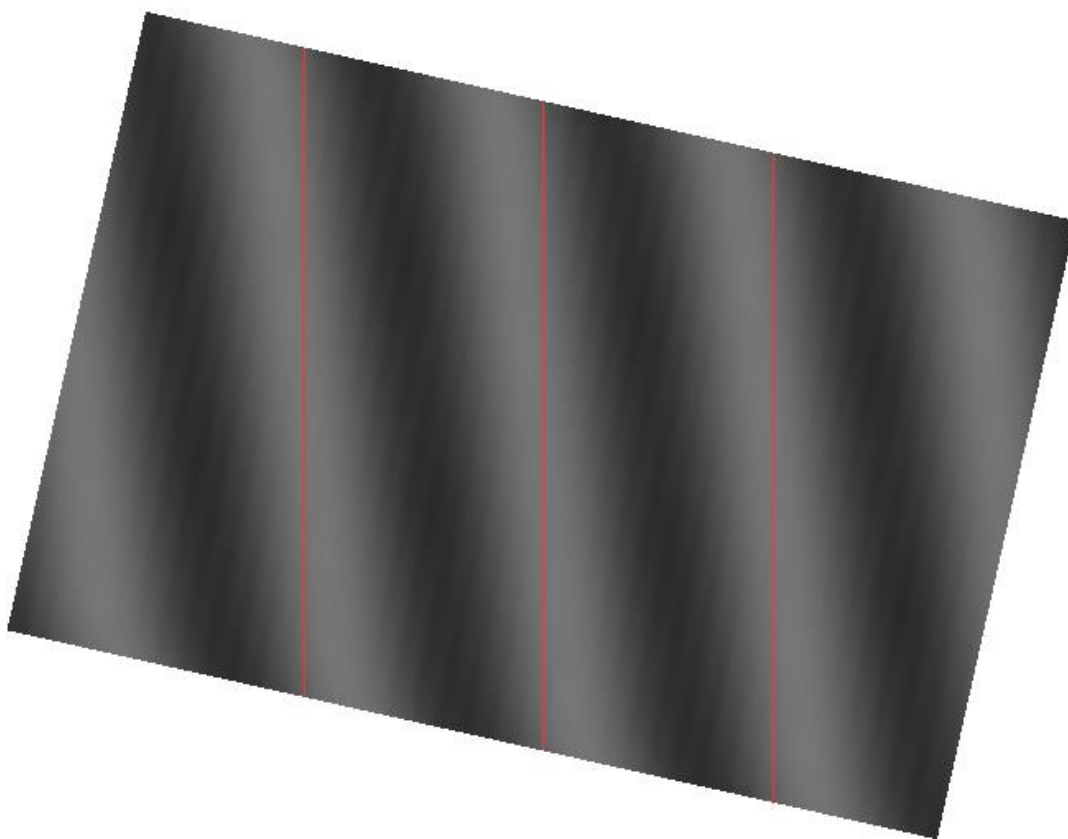
### 5.3.1 Metoda postupné otáčení obrázku

Nejjednodušší metodou může být postupné natáčení normalizovaného obrázku.



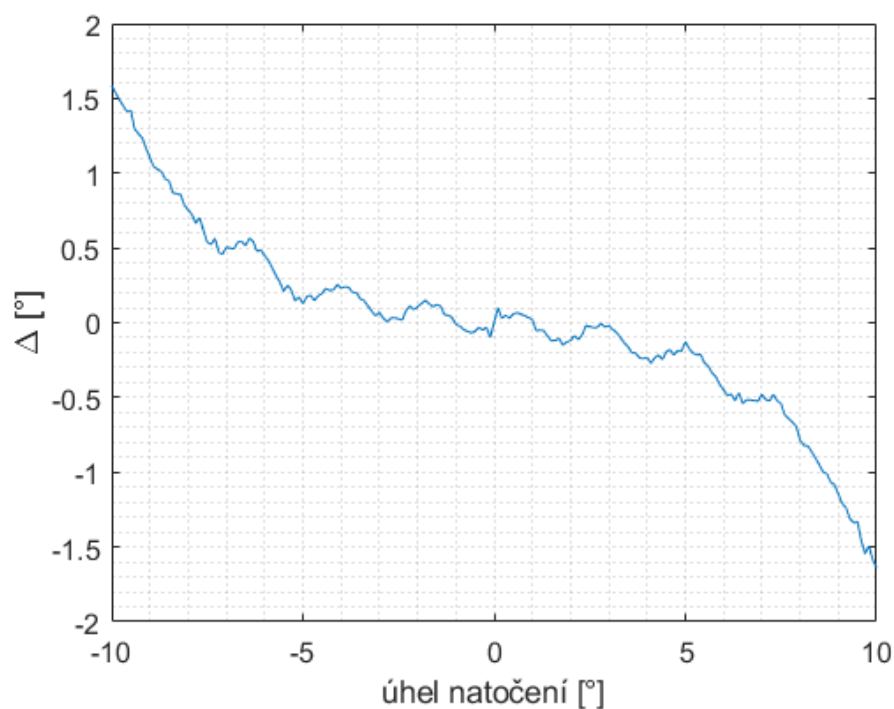
**Obrázek 25: Rozostřený obrázek pořízen při podmínkách:  $rot_z=2^\circ$**

Metoda spočívá v postupném otáčení obrazu a uložení maxima z průmětů jednotlivých sloupců na vodorovnou osu. Úhel, při kterém bylo detekováno největší maximum, je prohlášen za úhel natáčení moaré vzoru. Úhel  $\alpha_m$  je taky možné vypočítat z invertovaného obrazu, jelikož jsou hledány maxima moaré interference, které jsou reprezentována černou barvou. Perioda tmavých a světlých pruhů je zpravidla stejná, takže kdyby byla hledána minima, tak by bylo dosaženo stejných výsledků. Zásadní chybou této metody je, že maxima se nenajdou ve chvíli, kdy jsou světlé pruhy kolmé na vodorovnou osu.



**Obrázek 26: Otočený obraz s označenými sloupci, jejichž součet dává největší detekovaný maximum**

Šířka tmavých a světlých pruhů při otáčení způsobí, že suma sloupců na rohu postavených bude větší než suma pruhů kolmých na horizontální osu. Lze tedy říci, že tato metoda má tím větší chybu, čím širší je pruh, jehož vertikální suma je měřena.

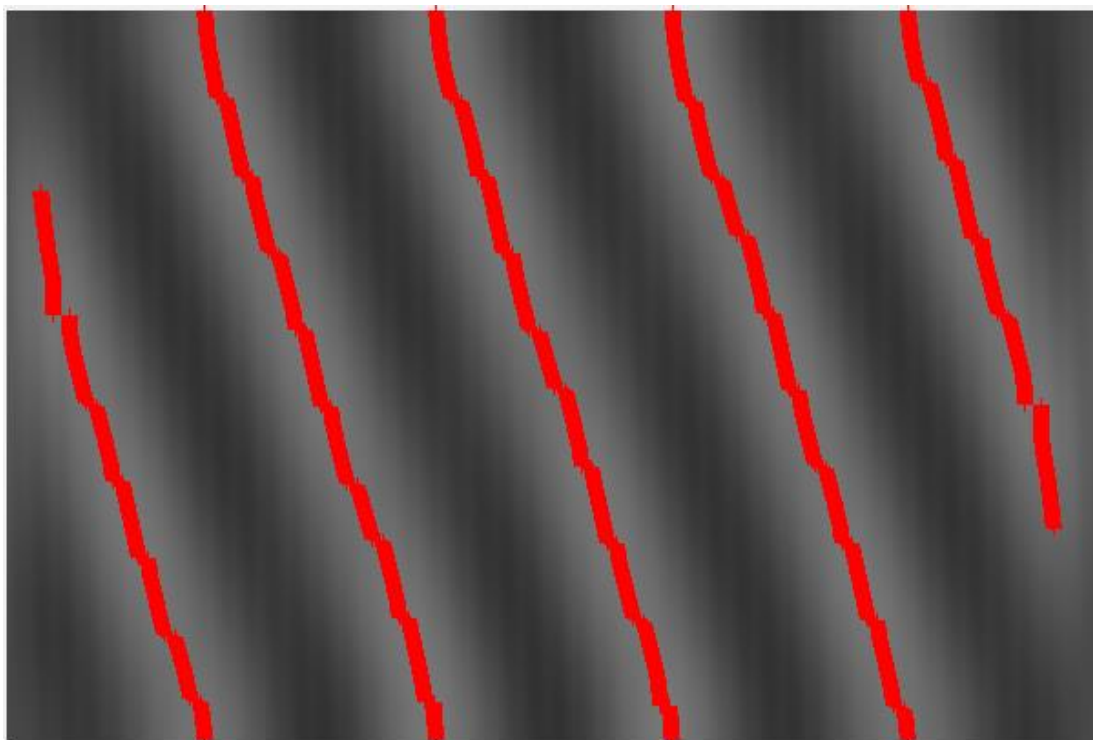


**Graf 10: Absolutní chyba určení otáčení horního vzoru vůči dolnímu**

Z Graf 10 je vidět, že je metoda poměrně přesná i navzdory jednoduchosti a zmíněné chybě metody. Maximální chyba na intervalu  $\langle -5^\circ; 5^\circ \rangle$  je  $0,3^\circ$ .

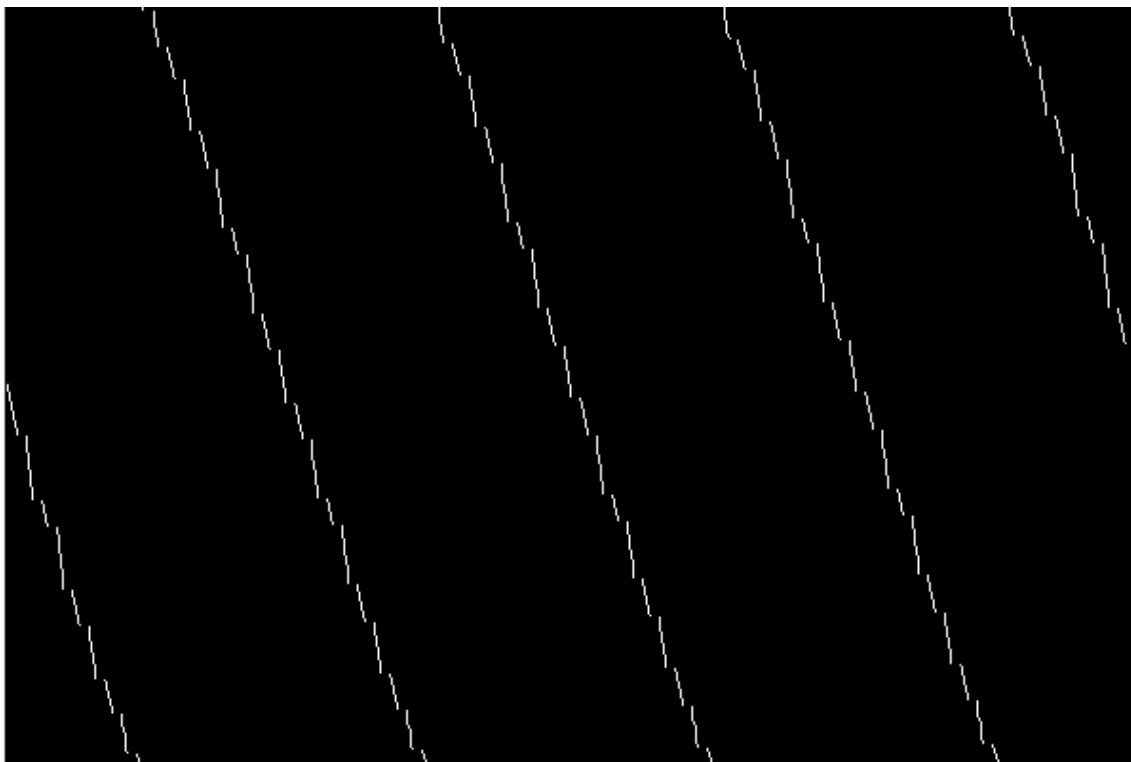
### 5.3.2 Proložení maxim řádků přímkou

Další možností je po řádcích najít maxima rozostřeného obrazu, jak lze vidět na Obrázek 23. Při kvalitním rozostření se průběh jasových hodnot na řádku podobá sinusovce. Jelikož pruhy jsou nakloněné, tak tyto maxima po řádcích se postupně posouvají; maxima se mohou objevit i ztratit. Na Obrázek 25 je vidět celkem 5 maxim, z nichž 3 jsou detekovatelné v každém řádku, zbylé dvě pouze od čtvrtiny, respektive od tří čtvrtin.

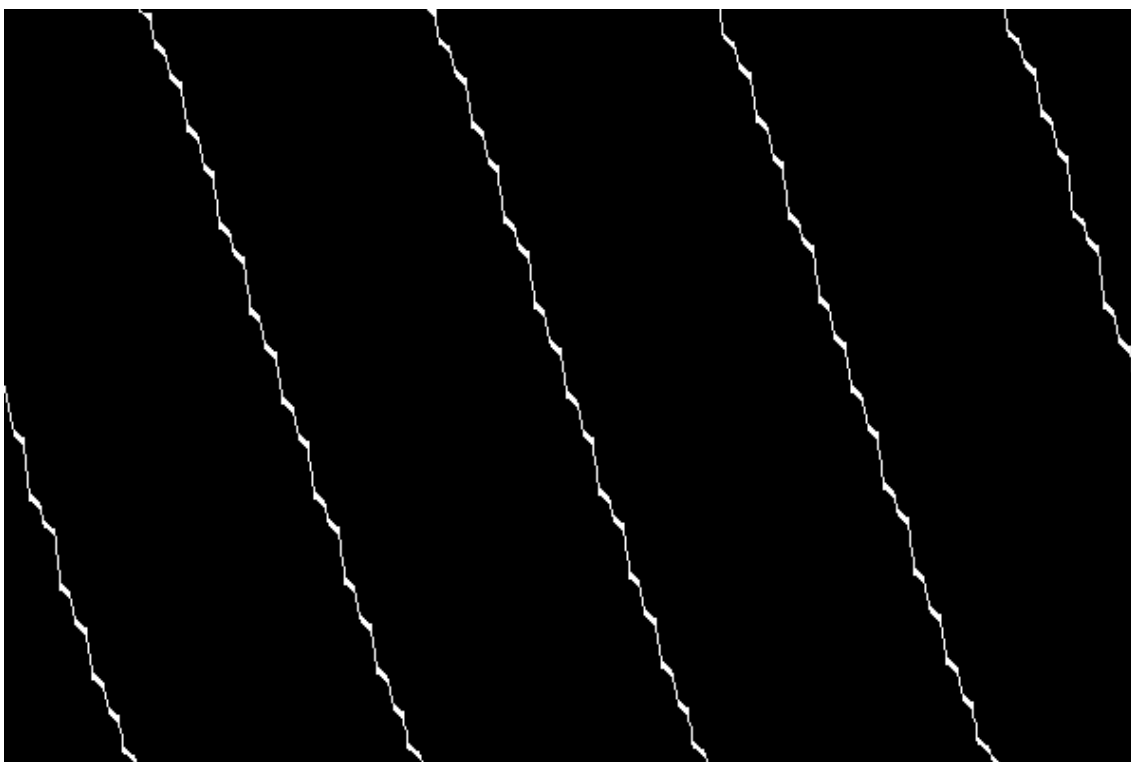


**Obrázek 27: Detekovaná maxima jednotlivých řádků**

Byla navržnuta metoda pro nalezení a uložení těchto bodů. Následně byl vytvořen pomocný binární obraz, na kterém jsou tyto body zobrazeny. Pro klasifikaci nalezených maxim byla uvažována metoda shlukování jednotlivých bodů pomocí k-means, kde by bylo potřebné nejdříve vhodně určit počet hledaných pruhů a taky vhodně umístit počáteční centroidy, ale tuto možnost k-means funkce v prostředí MATLAB nemá [10]. Byla tedy navržnuta jiná metoda.

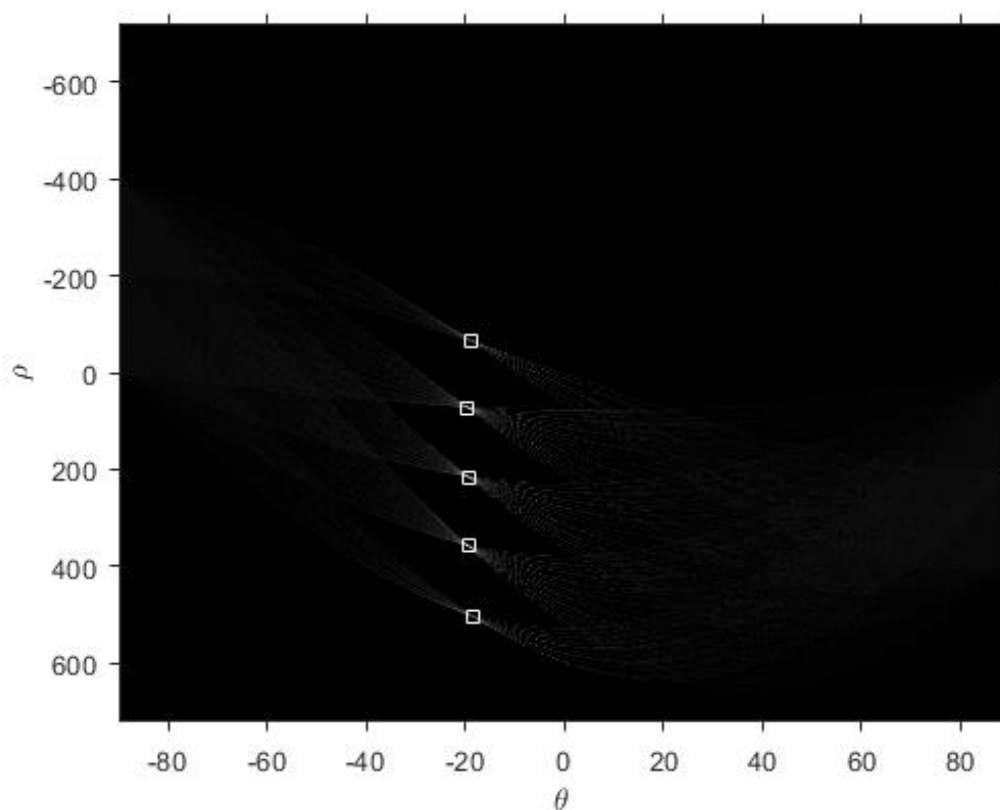


**Obrázek 28: Maxima řádků zobrazené na pomocné binárním snímku**



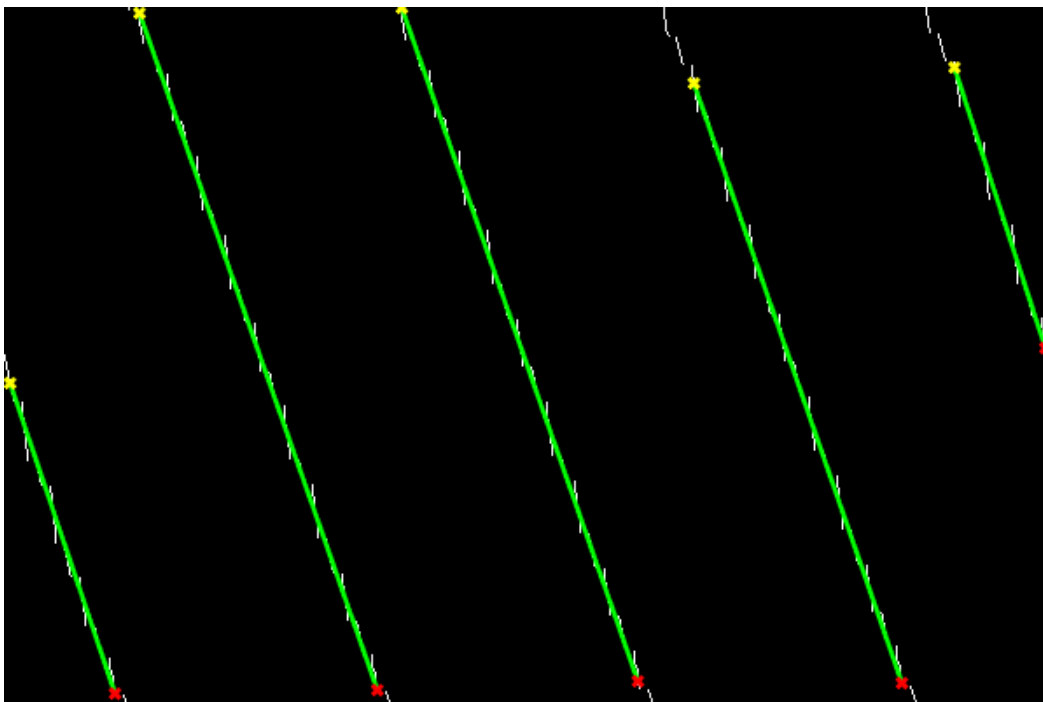
**Obrázek 29: Maxima řádků v binárním snímku po morfologické uzavření**

Na Obrázek 28 je vidět, že mezi maximy jednotlivých řádků je občas větší skok než jeden pixel. To způsobí přerušované čáry, které lze spojit pomocí dilatace. Přesněji řečeno: pomocí morfologického uzavření (dilatace následována erozí [1]), ale při strmějších úhlech moaré pruhů i to je nedostačující. Při větších úhlech, a to při otočení pohyblivého vzoru o  $8^\circ$ , což by generovalo moaré proužky o sklonu  $55^\circ$  dle vzorce (20), čáry po uzavření zůstávají přerušené. Samozřejmě by to šlo řešit pomocí dilatací s větším strukturním elementem, ale i tak by jednotlivé čáry zůstávaly nehladké, což by způsobilo nevhodné proložení přímkou a chybné určení sklonu. Proto byla navržnuta metoda s Houghovou transformací pro proložení přímek přerušovaných segmentů.



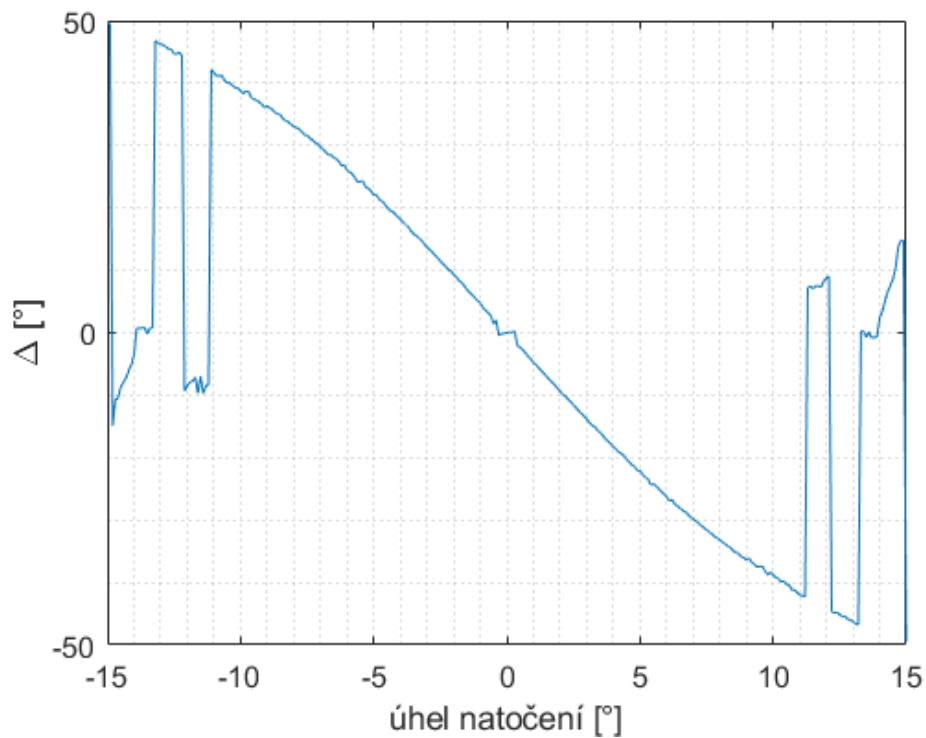
**Graf 11: Výsledek Houghovi transformace Obrázek 28**

Každý nalezený uzel reprezentuje jednu dominantní přímku v obrazu, z nichž lze určit sklon přímky.



**Obrázek 30: Nalezené dominantní čáry pomocí Houghovi transformace**

Bohužel ani tato metoda při strmějších úhlech moaré pruhů (působící fragmentace čar) nefunguje.



**Graf 12: Absolutní chyba metody určení sklonu moaré přímky pomocí Houghova transformace z maxim řádků na celém intervalu**

Jak je z Graf 12 patrné, chyba stanovení úhlu natočení horního vzoru vůči dolnímu je poměrně velká a s rostoucím úhlem se zvyšuje. Tato metoda poskytuje mnohem horší výsledky než metoda založená na pouhém otáčení vzoru.

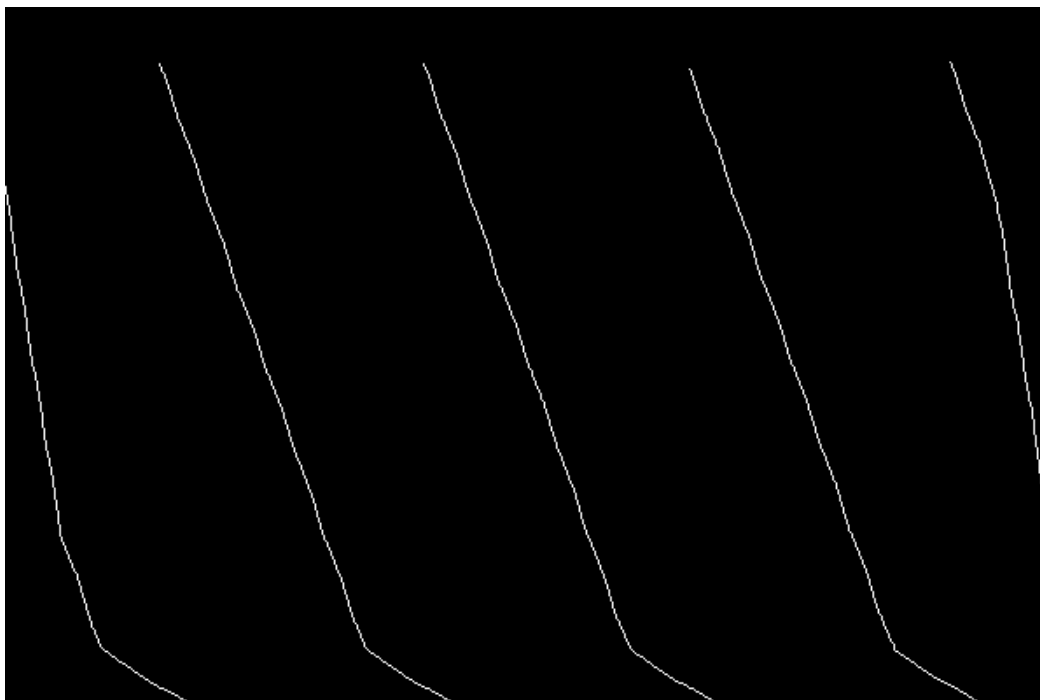
### 5.3.3 Určení úhlu z natáčení kostry

Protože největší chyba metody „proložení maxim přímkou“ spočívala v tom, že nalezená maxima byla přerušená či nehladká, byla navržena metoda proložení skeletu pruhů přímkou. Jelikož skelet je spojitý objekt, měl by vykompenzovat předem zmíněnou chybu. Pro spočítání skeletu je zapotřebí mít binární obraz, který lze získat jednoduše uniformním prahováním z normalizovaného obrazu. Prahování bylo provedeno s uniformním prahem 0.

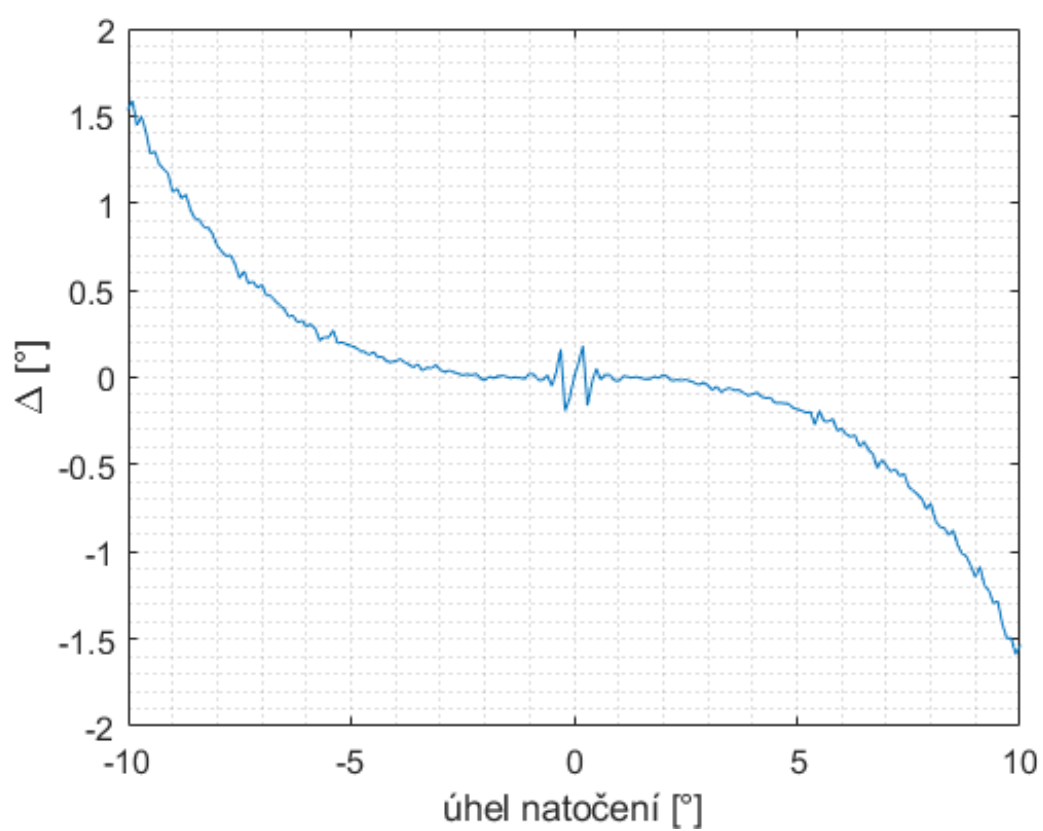
Skelet čili kostra je reprezentace objektů v obraze za pomoci tenkých čar. Tyto čáry jsou sjednocením bodů odpovídajících středům kružnic, které jsou obsaženy v objektech a dotýkají se její hranice nejméně dvěma body. Získaná kostra může být tlustší než jeden obrazový bod (pro tento případ neideální). Byla použita funkce *bwskel* v prostředí MATLAB, která ve všech testovaných případech vrátila pouze jeden pixel široké čáry. Tato funkce používá pouze spojení ve čtyřkolech a zachová Eulerovo číslo [1, 9]. Je třeba zmínit, že takto nalezený skelet nemusí odpovídat bodům maxim.

Bylo by možné vyzkoušet již zmíněnou metodu postupného otáčení a hledání maxim pro určení úhlu natočení moaré pruhů. Obrázky skeletu byly oříznuty, neboť čáry blízko k okraji obrázku byly zkreslené, jak je vidět na Obrázek 31.





**Obrázek 31: Skelet binarizovaného a normalizovaného obrazu**



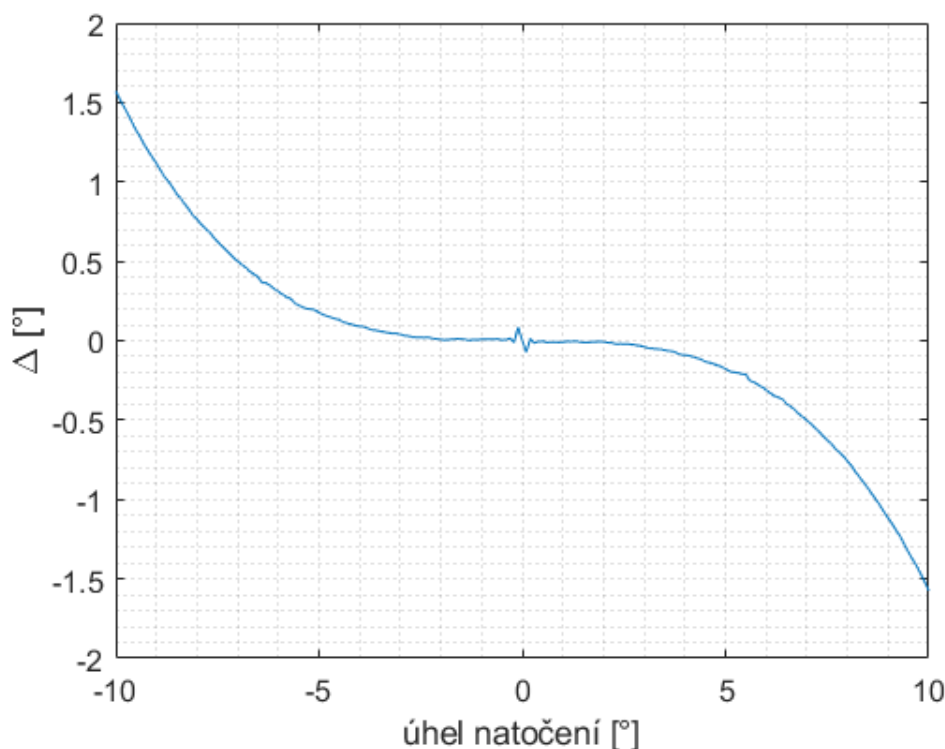
**Graf 13: Absolutní chyba metody „otáčení skeletu“ na intervalu**

V Graf 13 je vidět, že tato metoda vede k poměrně přesným výsledkům. Na intervalu  $\langle -5^\circ; 5^\circ \rangle$  největší absolutní odchylka nepřekročí hodnotu  $0,2^\circ$ .

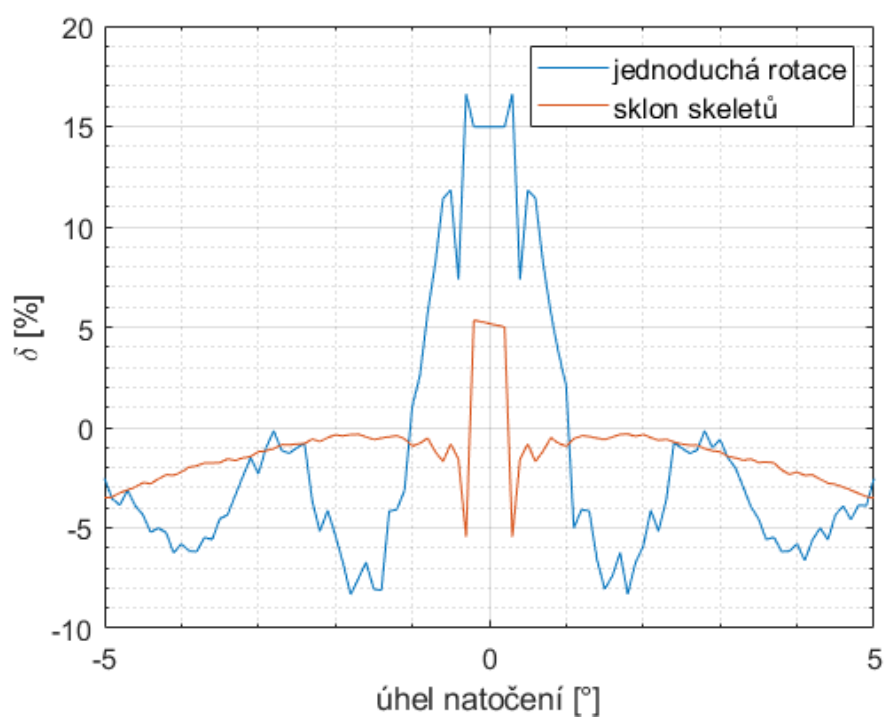
### 5.3.4 Proložení skeletu přímkou

Cílem původní myšlenky je proložit nalezenou kostru přímkou pro přesnější výsledek. Chyba byla sice rozebrána v podkapitole 5.3.1 tady kvůli tloušťce čar by neměl vyskytovat. Byly navrhnuté dvě různé verze. V první verzi je sklon čar určen z průměru sklonů jednotlivých přímek a v druhé byl vypočítán z mediánu. Obě varianty dávaly téměř stejné výsledky. V dalších případech budou brány jen průměry sklonů, jelikož tato metoda více odpovídá skutečné hodnotě v případě, že vstupní data obsahují málo šumu; v tomto případě by taková chyba mohla být způsobena přímkou s mnohem odlišným sklonem než ostatní.

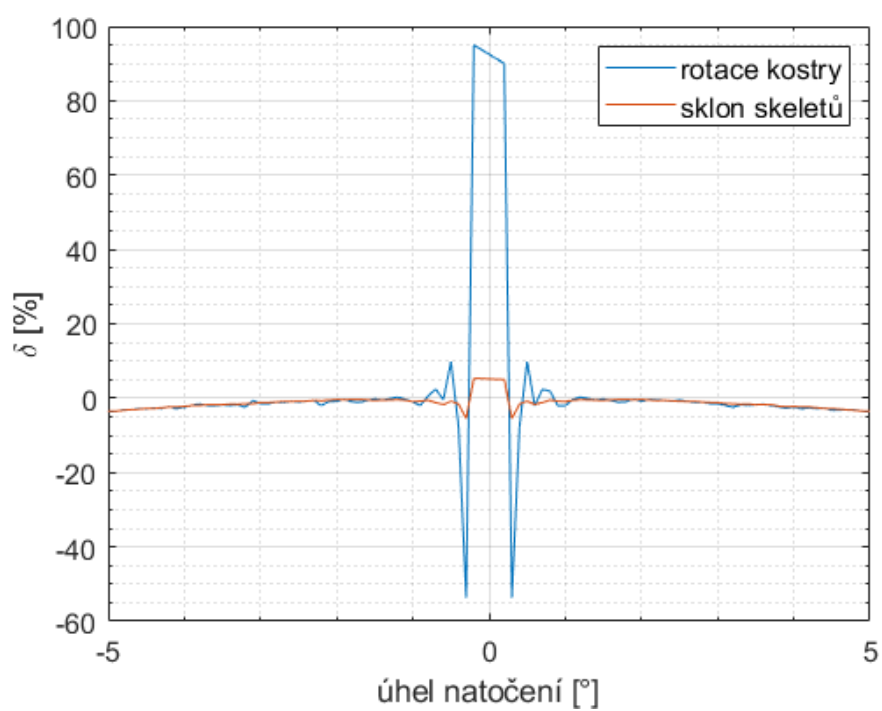
Tato metoda je o něco přesnější než předchozí, na celém rozsahu měření, včetně hodnot blízkých nule. Porovnání absolutní chyby metod je uveden níže. Metody s Houghovou transformací nejsou porovnány, jelikož Vykazovaly největší chyby a snížily by přehled jednotlivých průběhů.



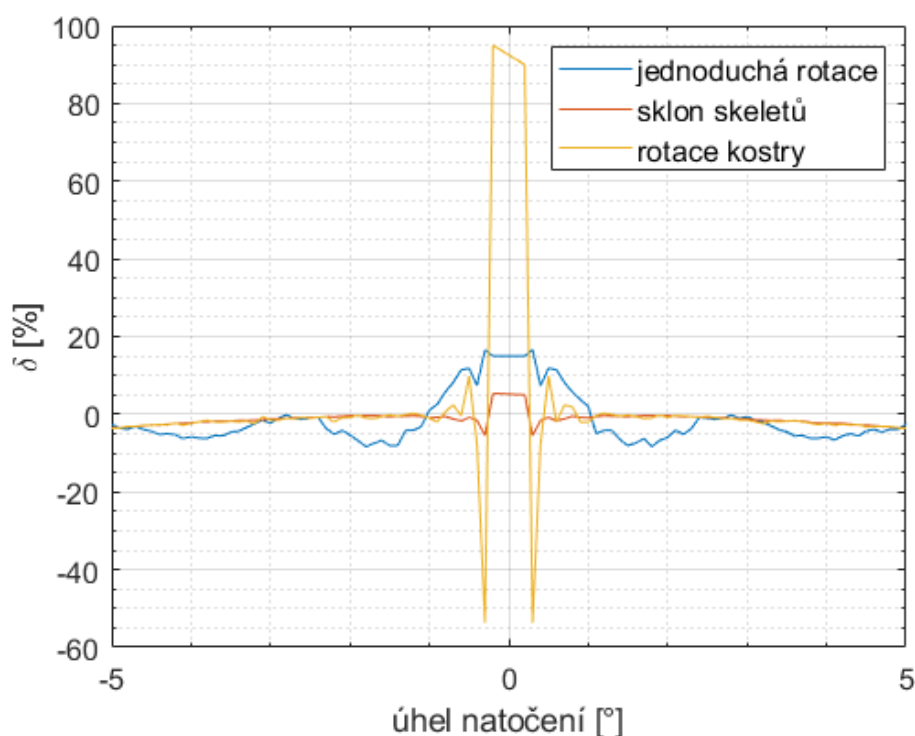
**Graf 14: Absolutní chyba metody „proložení skeletu přímkou“**



**Graf 15: Porovnání relativní chyby metody „jednoduchá rotace“ a „proložení skeletu přímkou“**



**Graf 16: Porovnání relativní chyby metody „otáčení skeletu“ a určení „proložení skeletu přímkou“**



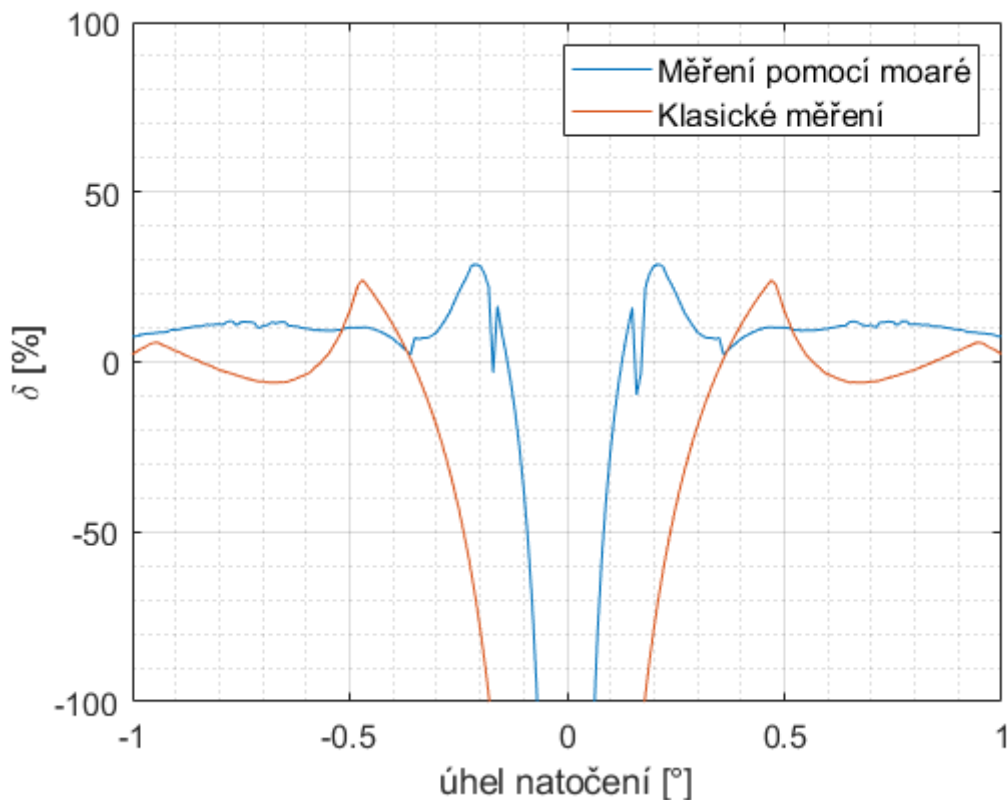
**Graf 17: Porovnání relativní chyby metody „jednoduchá rotace“, „proložení skeletu přímkou“, „otáčení skeletu“**

Jak je z Graf 15, Graf 16 a Graf 17 vidět, nejpřesnějším postupem se ukázala metoda, která vycházela z určení směrnice přímky skeletů. Relativní chyba byla sice při malých úhlech  $\langle -0,3^\circ; 0,3^\circ \rangle$  poměrně velká (je způsobena poměrně velkou absolutní chybou v dané oblasti), ale vyjma této části zůstala v intervalu  $\langle -5^\circ; 5^\circ \rangle$  pod 5 %. Data pro tištění dalších grafů jsou v příloze 2. Kód pro testování algoritmů popsán v podkapitolách 5.3.1 – 5.3.4 je v příloženém souboru *mainZ.m* s komentovanými kroky.

### 5.3.5 Porovnání navržených metod s přímým měřením otáčení

Jako nejpřesnější z řešení se ukázala metoda proložení skeletu přímkou. Toto řešení bylo porovnáno s přímou metodou měření. Metoda přímého měření je skoro stejná jako byla metoda proložení skeletu přímkou s tím rozdílem, že namísto skeletu moaré čar je proložen skelet původního obrázku otáčivého vzoru. V tomto případě bylo při hodně malých úhlech natočení dosaženo přesnějších výsledků v porovnání s metodou používající moaré pruhy. Jelikož se jedná o pohyb kolem optické osy (čili vzdálenost

vzoru od obrazové roviny je konstantní), je měření natočení pruhů z ideálního obrazu velice přesné. Porovnání přesnosti obou metod je vidět na Graf 18 níže. Přesnost této metody by mohla být lepší při zvolení vzorů mající menší rozdíl v periodách (například v poměru 95:100).



**Graf 18: Porovnání relativní chyby metody určení úhlu natočení kolem osy Z pomocí měření sklonu moaré záznějů a s klasickou metodou**

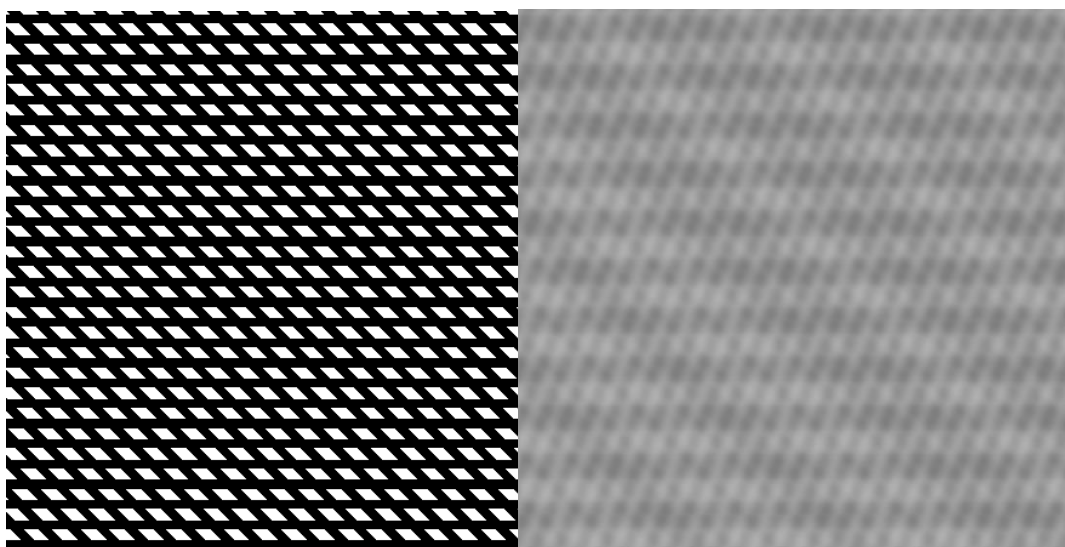
### **5.3.6 Měření úhlu natočení vzoru pomocí periody moaré záznějů**

V předchozích podkapitolách 5.3 byly uvažovány vzory s různou roztečí a metody měření byly založeny na měření úhlu natočení vzorů, nikoli na měření periody moaré interferencí. Tyto metody byly citlivější pro malé úhly natočení, ale při měření větších úhlů, jak patrné z Graf 1, citlivost metody klesla. Pro tuto metodu byla velikost výsledného obrazu zvětšena na 600x600 pixelů, protože moaré pruhy vznikají podél svislé osy. Zpracovaný obraz byl hned po jeho vygenerování transponován, neboť původní metoda pro měření moaré interferencí počítá s tím, že interference vznikají

paralelně k vertikální ose. Následně byla stanoven minimální úhel otočení, při kterém se alespoň jedna perioda moaré čar vmísť do snímané roviny.

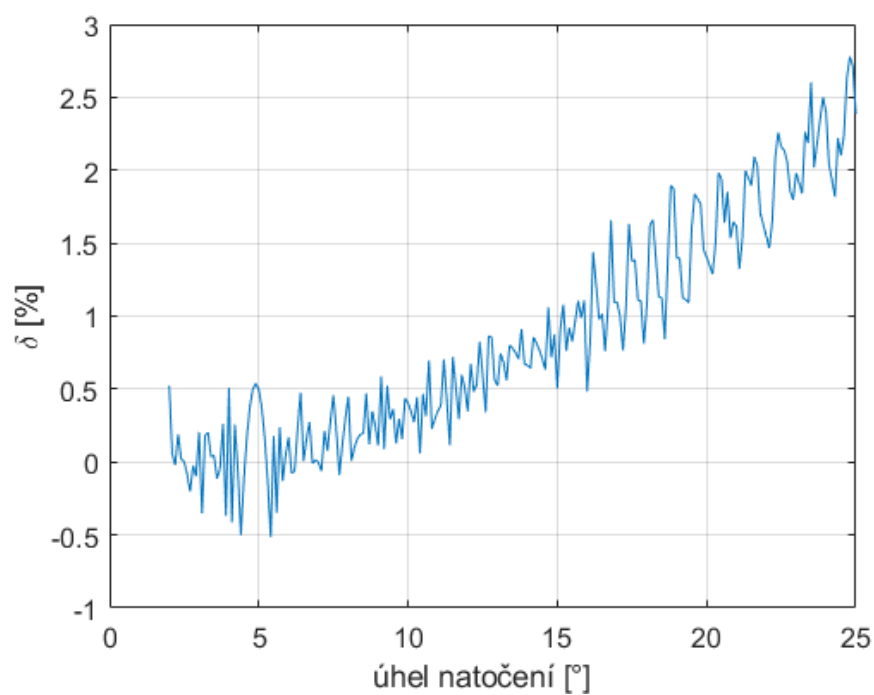
$$\alpha_{min} = \left\lceil 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{f \cdot roztec}{2 \cdot H \cdot vo} \right) \right\rceil \quad (35)$$

Kde  $vo$  je výška obrázku v pixelech. V tomto případě  $\alpha_{min} = 2^\circ$ . Maximální úhel, který je možné měřit touto metodou je omezen definičním oborem funkce  $\sin^{-1} \langle -1; 1 \rangle$  a oborem hodnot  $\langle -90^\circ; 90^\circ \rangle$  téže funkce. Protože periody jsou stejné při otočení v záporném směru, tak byl algoritmus testován pouze pro kladné hodnoty.

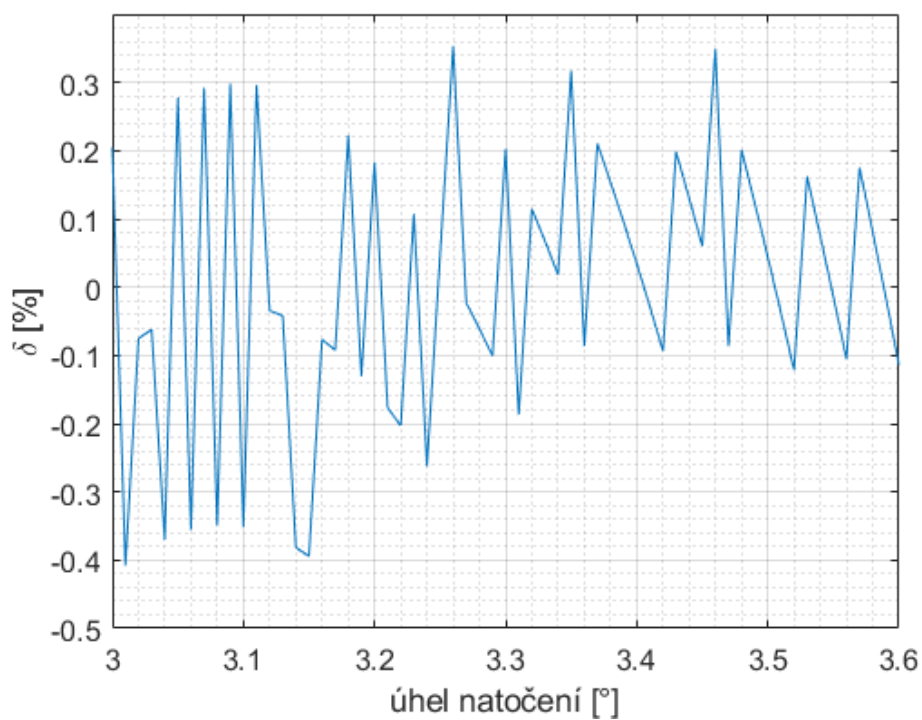


**Obrázek 32: Výsledný obrázek (vlevo) a tentýž obrázek po rozostření (vpravo) při natočení horního vzoru o  $45^\circ$  v kladném směru**

V tomto případě ani po rozostření nelze najít periody moaré interferencí. Na Obrázek 32 je vidět, že moaré čáry jsou velice slabé a téměř vodorovné. To znamená, že v řádku nebudou nalezena žádná maxima, ani minima. Ani po transponování obrázku nebo při změně směru algoritmu (z řádků na sloupce; principiální ekvivalent) nedává prezentovatelné výsledky. Z praktických důvodů byly testované pouze obrázky, kde úhel natočení nepřesáhne  $25^\circ$ .

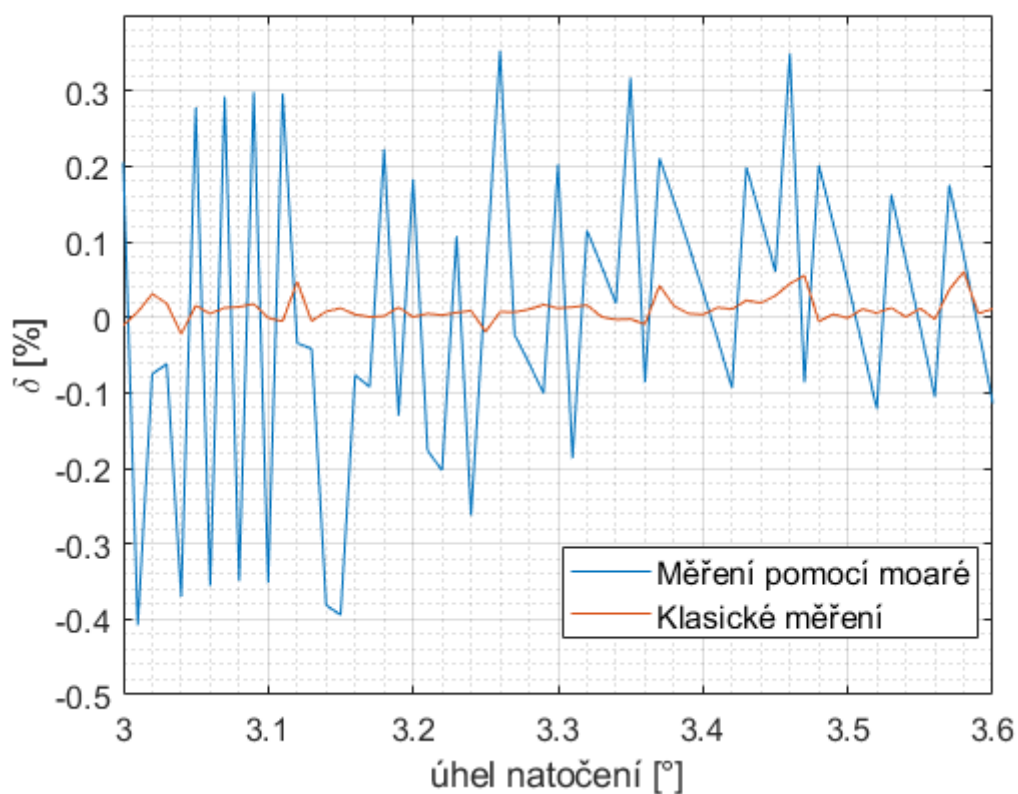


**Graf 19: Relativní chyba metody určení úhlu natočení vzoru v ose Z pomocí  
periody moaré interference.**



**Graf 20: Relativní chyba metody určení úhlu natočení vzoru v ose Z pomocí  
periody moaré interference na užším intervalu s krokem 0,01°**

Z Graf 19 je vidět, že s rostoucím úhlem natočení relativní chyba roste. Proto byly pro podrobnější měření zvoleny menší úhly natočení, tentokrát s jemnějším krokem. Výsledky jsou zobrazeny v Graf 20. Tato metoda byla také porovnána s přímým měřením otáčení. Jak již se ukázalo v případě měření otočení kolem osy Z, byla tato metoda přesnější.



**Graf 21: Porovnání relativní chyby metody určení úhlu natočení kolem osy Z pomocí měření periody moaré záznějů a z původního obrázku**

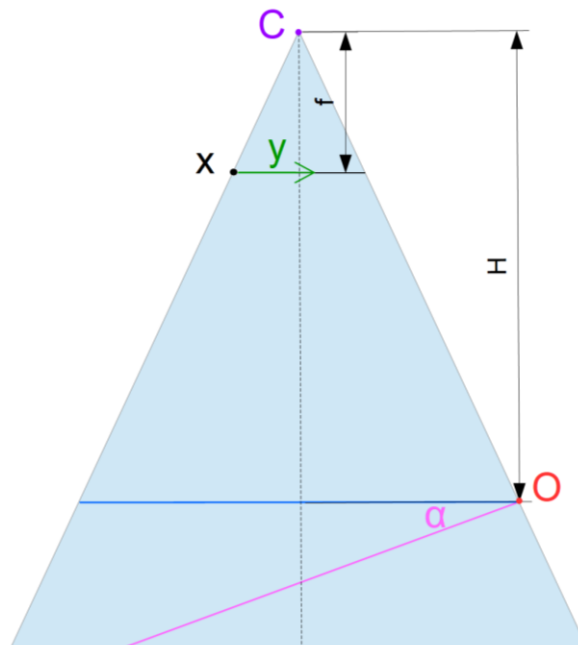


## 5.4 Náklon v ose X

V dosud probraných metodách se vždycky jednalo o soustavy, ve kterých byly vzory v prostoru umístěny v souběžných rovinách, které byly zároveň paralelní s obrazovou rovinou. V této podkapitole je uvažována i rotace vzorku kolem jiné osy, než je osa optická.

Parametry měřicího systému:

- Vzdálenost vzorů od kamery: 600 mm
- Velikost výsledného obrazu: 1000x1000 pixelů
- Ohnisková vzdálenost: 100 mm
- Vzory nejsou vzájemně posunuté
- Vzory jsou otočeny kolem osy  $X$
- Střed, kolem kterého se točí horní vzor, se promítá do středu obrazu  $O[x/2; y]$ .
- Vzdálenost vzorů se mění úměrně se vzdáleností od středního bodu a s úhlem natočení
- Rozteč vzorů je konstantních 100 mm



Obrázek 33: Ukázka pracovišti při měření úhlu otočení kole osy  $X$  vhléd z leva

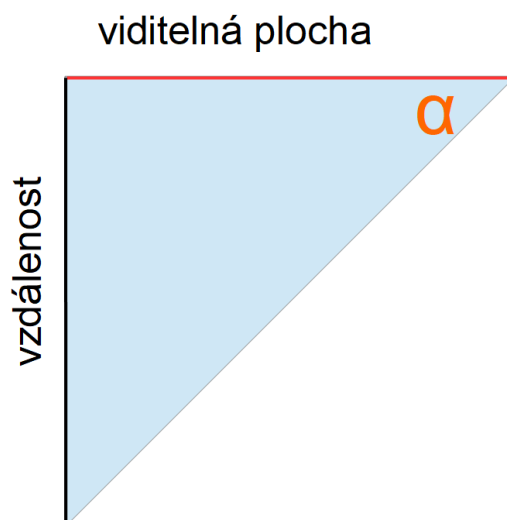
Jak je z Obrázek 33 patrné, v tomto případě byly posunuty tyto body: střed otáčení (červené  $O$ ) se nyní nenachází uprostřed vzorků, nýbrž na boční části. Horní vzorek se „stane dolním“, aby usnadnil odvození vzorce a tato metoda měření nepožadovala změnu funkce pro generování obrázku. Výpočet je jednodušší, neboť není třeba řešit zvlášť část pohyblivé plochy, která by se zdvihala nad statickou plochu. Z hlediska obrazové roviny horní část vzoru klesne pod plochu dolního vzoru, přičemž spodní řádek obou vzorů zůstává ve stejné výšce od středu promítání  $H$ .



**Obrázek 34: Ukázka vygenerovaného obrazu**

Měření úhlu je založeno na předpokladu, že otočený vzorek se jeví, jako kdyby měl menší rozteč vůči hornímu okraji obrázku. Jelikož pro určení vzdálenosti dvou vzorů už byl navržen algoritmus v podkapitole 5.2, nebude zde znovu vysvětlován a bude bez úprav používán.

Algoritmus po řádcích měří vzdálenost vzorů pomocí vzniklých moaré interferencí. Je zapotřebí určit meze, pro které tento algoritmus může ještě fungovat; ty jsou dány měřicím rozsahem metody popsané v kapitole 5.2. Nejdůležitější je zjistit minimální sklon vzoru, pro který už měření vzdálenosti ani na horní části obrazu (kde jsou vzory v prostoru nejdál od sebe) není možné.



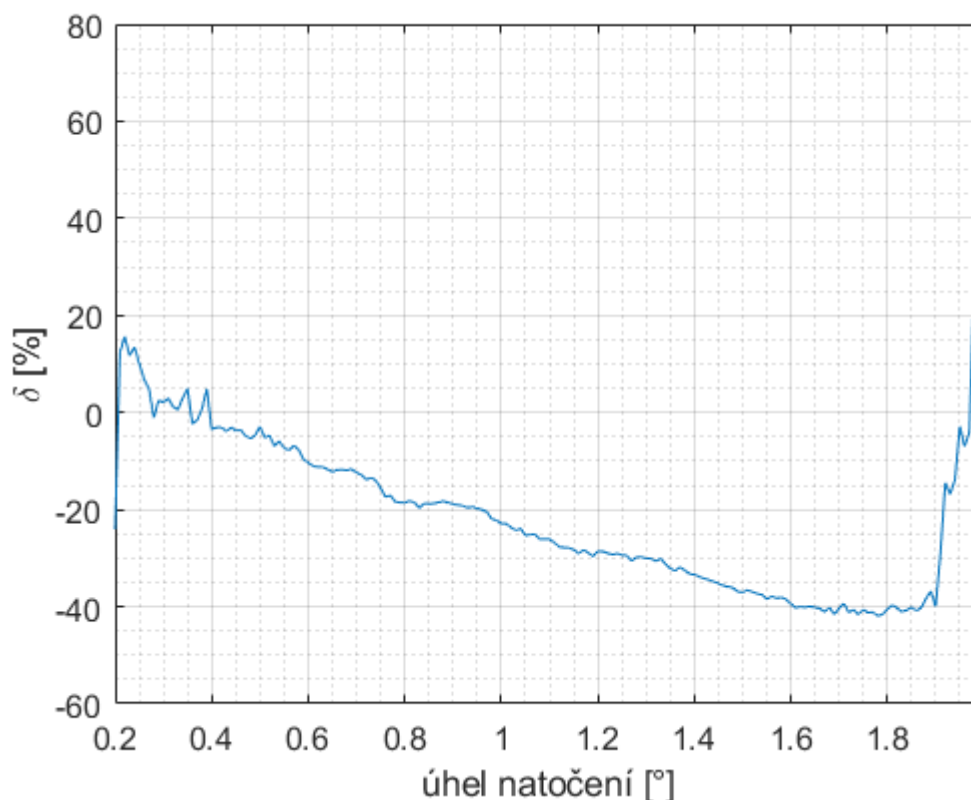
**Obrázek 35: Skica pro určení maximálního sklonu**

Na Obrázek 35 je vidět, že minimální úhel  $\alpha$  je určen minimální vzdáleností vzorů a počtem řádků kamery/obrazu.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{vzd_{min} \cdot f}{H \cdot y} \right) \quad (36)$$

Pro dané podmínky tohoto měření je alfa rovna  $1^\circ$ . Horní mez je teoreticky  $90^\circ$ , kdy už je otočený vzor vidět kolmo; veškeré měření vzdálenosti je nemožné.

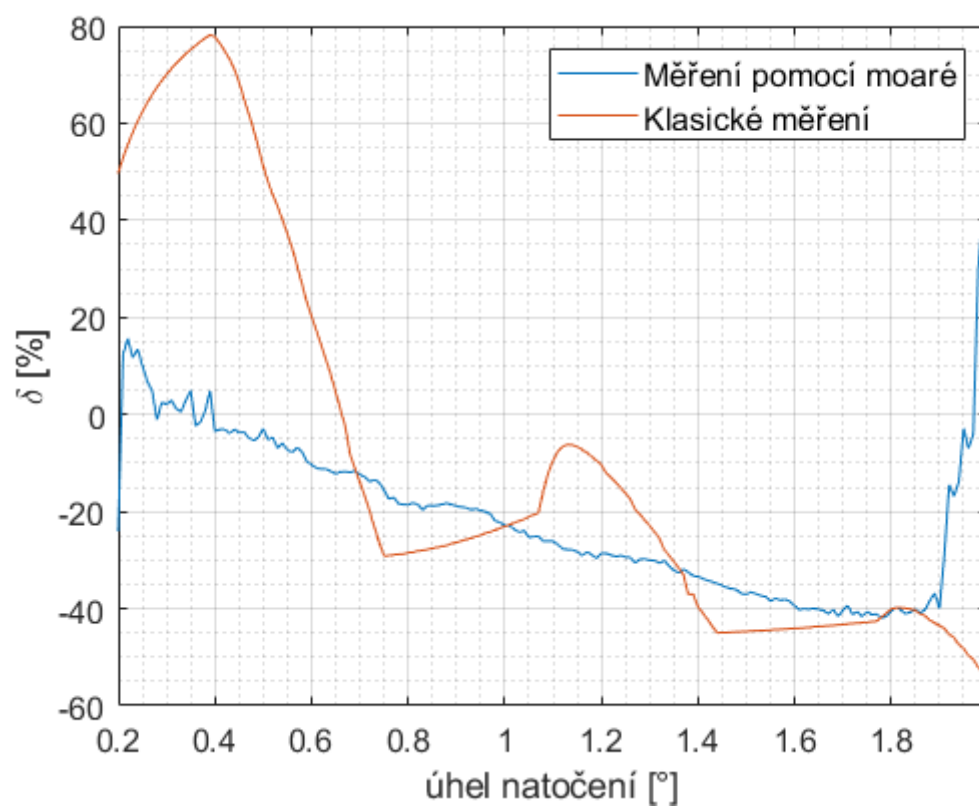
Výsledný úhel je určen sklonem přímky, jejíž funkční hodnotou je vzdálenost vzorů a vstupem je poloha tohoto bodu vzdáleného od středu otáčení, který byl promítnut do dané přímky. Výšky (vzdálenosti horního vzoru od dolního) zjištěné v řádcích jsou filtrovány, jelikož se může stát, že blíže ke středu otáčení byla detekována větší vzdálenost než na dolním kraji obrázku. Z teorie je jasné, že taková chyba může být způsobena chybou měření vzdálenosti. Dále jsou vyfiltrovány odlehlé hodnoty. Pro tuto filtraci byla použita funkce *rmoutliers* v prostředí MATLAB s plovoucím oknem o 10 hodnotách s metodou *movmedian*, která za odlehlé hodnoty považuje hodnoty ležící ve vzdálenosti větší, než je trojnásobek mediánové absolutní odchylky zkoumaných hodnot. [22]



**Graf 22: Absolutní chyba algoritmu pro natočení vzoru v ose X**

Nejpřesnější odhady úhlů natočení byly získány v intervalu  $\langle 0,2^\circ; 0,8^\circ \rangle$ . Obecně se dá říci, že tato metoda je zatím nejméně přesná a to z několika důvodů: Je založena na detekci vzdálenosti vzorů, což funguje pouze s určitou přesností a na ohraničeném intervalu. Tato metoda je, mimo jiné, založena na algoritmu pro určení moaré periody. Zdrojový kód s vysvětlujícími komentáři je uložen v příloze 1 v souboru *mainX.m*. Nárůst chyby po náklonů větší než  $1,9^\circ$  byl pravděpodobně způsoben sekundárními moaré zázněji v obrázku.

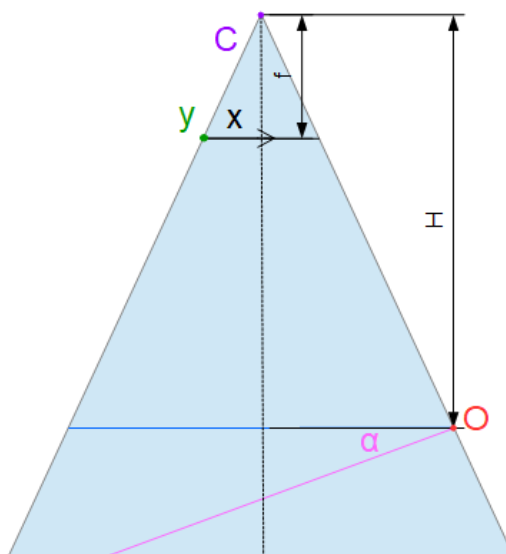
Metoda byla porovnána s měřenými hodnotami klasického měření bez pomocného vzoru, která byla založena na stejném principu jako měření vzdálenosti vzoru po řádcích. Na Graf 23 lze vidět relativní chyby měření úhlu natočení obou metod. I když na intervalech  $\langle 0,65^\circ; 0,7^\circ \rangle$  a  $\langle 1^\circ; 1,35^\circ \rangle$  bylo klasické měření přesnější než měření založené na moaré záznějích, dá se říci, že na měřeném intervalu, kdy ještě nedošlo k sekundárním záznějům moaré interference, byla zmíněná metoda přesnější.



**Graf 23: Porovnání relativní chyby metody určení úhlu natočení kolem osy  $X$  pomocí měření sklonu moaré záznejů z původního obrázku**

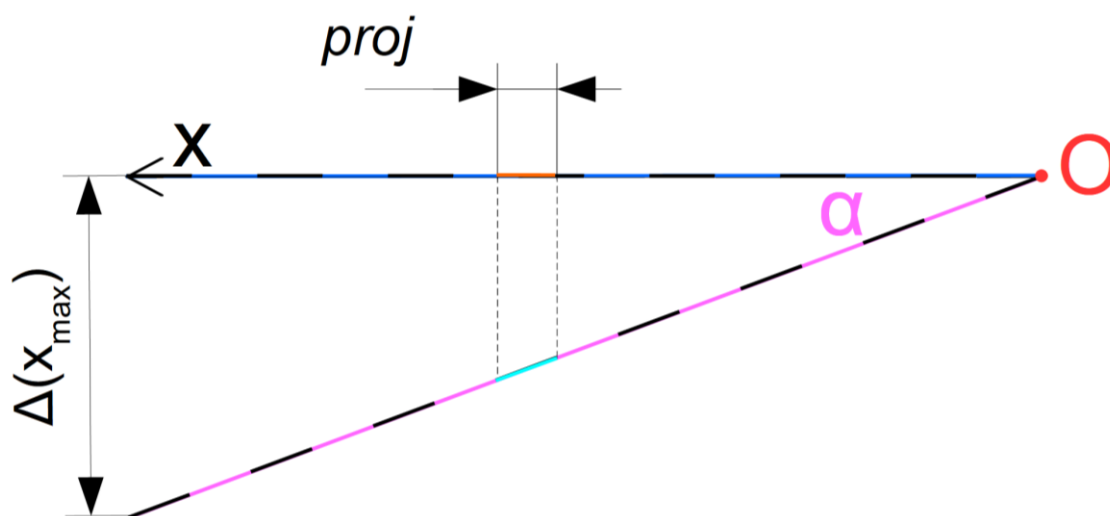
## 5.5 Náklon v ose Y

Při této úloze se používá obdobné nastavení systému jako v podkapitole 5.4, s tím rozdílem, že střední bod otáčení je umístěn na pozici  $O[x; y/2]$ . Pro snadnější měření byly rozměry obrázku upraveny na velikost 1200x200 pixelů, aby v obrázku bylo obsaženo co nejvíce moaré pruhů.



**Obrázek 36:** Schéma pracoviště při experimentu určení natočení vzoru v ose Y

Na Obrázek 36 je vidět, že horní vzor (růžový) je rotovaný a s dolním vzorem a s rovinou průmětny svírá úhel  $\alpha$ .



**Obrázek 37:** Ukázka změny periody dolního vzoru se vzdáleností od počátku

V tomto případě musí být uvažována změna šířky čar horního vzoru z pohledu kamery. Obecně se dá říci, že maximální šířka pruhů je pozorovatelná v případě, kdy jsou pruhy kolmé na optickou osu. Průmět pruhů na rovinu zafixovaného vzoru souběžných s průmětnou je:

$$proj = width \cdot \cos \alpha \quad (37)$$

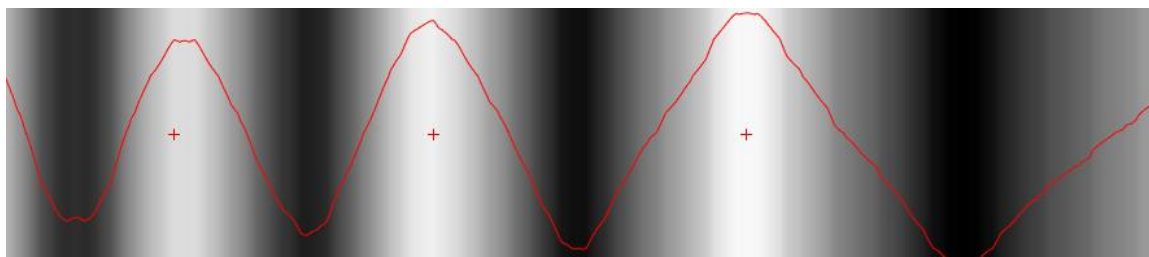
Kde *proj* je projekce šířky čáry  
*width* je šířka originální čáry  
 $\alpha$  je úhel natočení kolem osy y

Další faktor, který má vliv na velikosti průmětů čar je vzdálenost vzoru od kamery. Protože je střed otáčení umístěn na okraji horního vzoru, tak se vzor s rostoucí vzdáleností od tohoto bodu vzdaluje od kamery. Pokud poslední sloupec obrázku bude považován za počátek osy *X*, tak je možné zapsat změnu vzdálenosti od osy *X*.

$$\Delta(x) = x \cdot \tan \alpha \quad (38)$$

V tomto případě vzdálenost *x* může nabývat pouze kladné hodnoty. Vzdálenost daného bodu od kamery se přičítá ke vzdálenosti *H*. Je patrné, že čím větší je úhel natočení, tím tenčí se čáry jeví z hlediska kamery.

Protože perioda otočeného vzoru není konstantní podél osy *Y*, perioda moaré záznejů bude také neperiodická. Je ale je dopočitatelná, jelikož je známá pevná povaha obou vzorů a protože mají stejnou rozteč.



**Obrázek 38: Rozostřený obrázek výsledku získaný otočením vzoru kolem osy *Y* (s detekovanými maximy)**

Jak je z Obrázek 38 vidět, čím blíže jsou vzory v prostoru, tím podobnější mají periody. Jinými slovy mají na kraji obrázku mají stejnou periodu. Ze základního vzorce moaré interference (16) lze dospět k předpokladu, že mezi dvěma maximy dochází k předběhu period o jednu celou periodu vzorů. Jelikož se jedná o natočení kolmé na směr pruhů ve vzoru, tak nese každý řádek přípravku nese stejnou informaci. Jak je

vidět na Obrázek 39, body na přípravku  $A(a_x, a_z), B(b_x, b_z), C(c_x, c_z)$  leží v jedné přímce, jejichž průměty na obrázku představují body  $\mu_A, \mu_B, \mu_C$ . Vztahy mezi nimi jsou jednoduše odvozené z trojúhelníkové podobnosti:

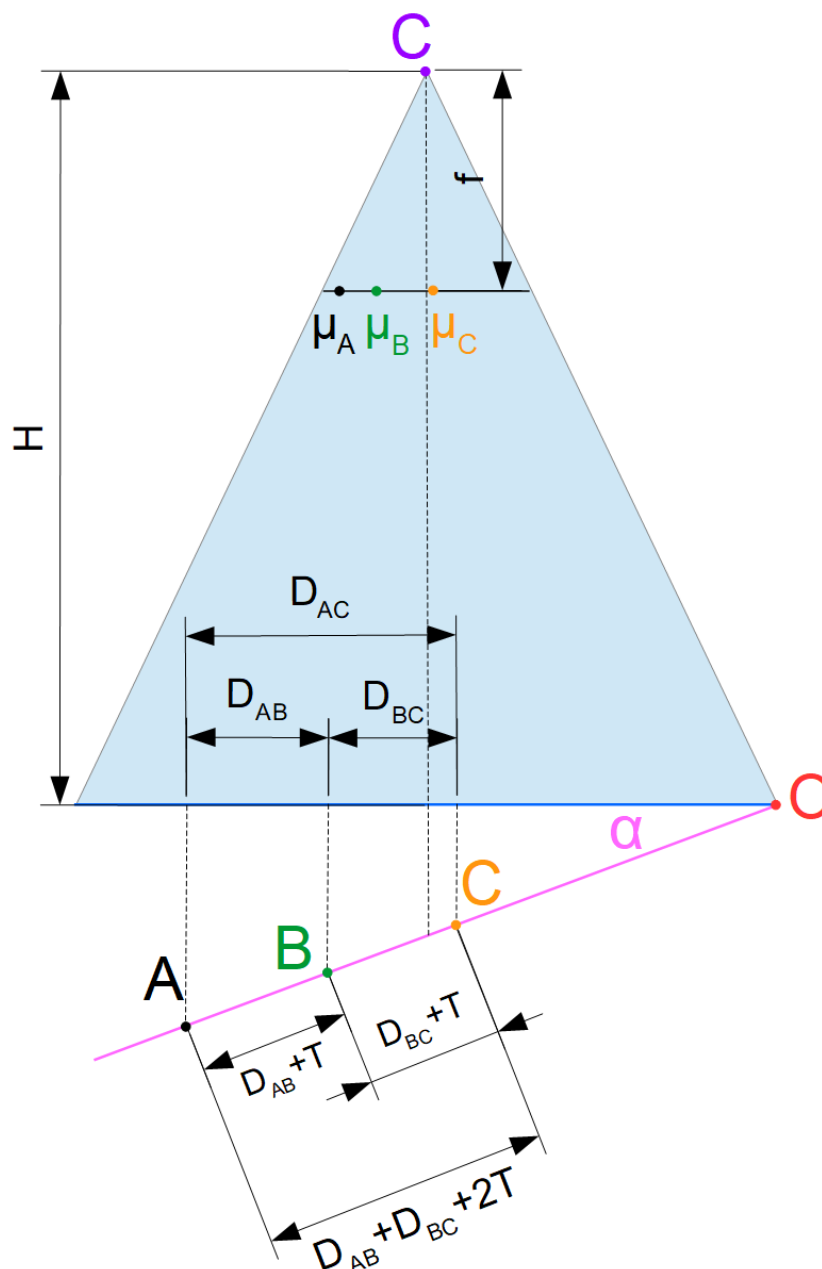
$$\begin{aligned}\mu_A &= f \cdot \frac{a_x}{a_z} \\ \mu_B &= f \cdot \frac{b_x}{b_z} \\ \mu_C &= f \cdot \frac{c_x}{c_z}\end{aligned}\tag{39}$$

Mezi dvěma maximy čáry dolního vzoru se získají vzdálenosti jedné periody, takže musí platit, že vzdálenost mezi skutečnými body otočeného vzoru je:

$$\begin{aligned}\|A, B\| &= D_{AB} + T \\ \|B, C\| &= D_{BC} + T \\ \|A, C\| &= D_{AB} + D_{BC} + 2T\end{aligned}\tag{40}$$

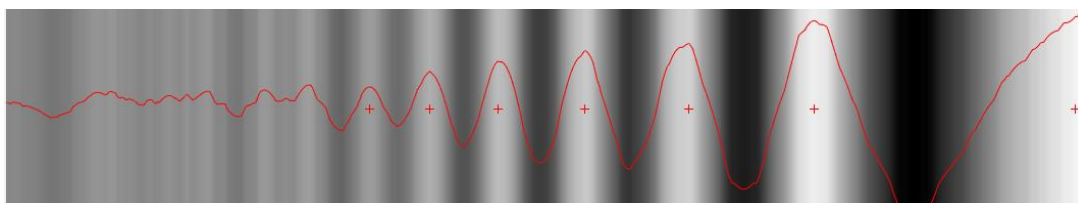
Kde pravá strana rovnice představuje vzdálenost bodů v rovině (kolmé s rovinou referenčního vzoru) dle Euklidovské vzdálenosti. Jedná se o soustavu šest rovnic se šesti neznámými (souřadnice bodů  $A(a_x, a_z), B(b_x, b_z), C(c_x, c_z)$ ). Řešení soustavy bylo vyřešeno v prostředí MATLAB. Výsledné vztahy byly uloženy do přiloženého souboru *expressions.mat* (viz příloha 1), které jsou načítány v hlavním skriptu *mainY.m*. Tento skript načítá již vyjádřené vztahy pro výpočet neznámých parametrů a dosadí naměřené parametry za známé parametry.





**Obrázek 39: Ilustrace pro princip měření rotaci kolem osy Y**

Algoritmus dále obsahuje metodu pro vybírání vhodné sekvence maxim. Jelikož z nastavení systému je známo, že pohybující se rovina má takové prostorové vlastnosti, které způsobí prodloužení periodu moaré zánějů ve výsledném obrázku zleva doprava – jak je vidět na Obrázek 38 – algoritmus vyhledává nejdelší sekvenci nalezených maxim podle této podmínky. Tento algoritmus je užitečný u některých obrázků, kde kvůli globálnímu prahu rozostření byla špatně detekovaná maxima. Na Obrázek 40 je vidět efekt popsaného algoritmu.



**Obrázek 40: Obrázek ukazující vliv algoritmu pro filtraci maxim**

Dále jsou uvažovány všechny po sobě následující trojice bodů z nalezené sekvence, z nichž lze určit sklon přímky. Z uložených sklonů je pak vybírán výsledný úhel, který je prohlášen za měřený. Tento úhel může být různě přesný v závislosti na bodech, které byly proloženy přímkou. Tato metoda je nejméně přesná, což je především způsobeno stálým výpočtem sklonu přímky ze třech po sobě následujících bodů. Přesnost metody by bylo možné zvýšit i pomocí automatického vytváření soustavy rovnic pro libovolný počet bodů, případně i nepřímo po sobě následujících v prostoru, z nichž by bylo možné vytvořit přímku, jejíž sklon více odpovídá k úhlu natočení pohyblivého bodu.

## 6. Aplikace pro detekci malých pohybů moaré vzorů

Aplikace byla vytvořena ve vývojářském prostředí MATLAB: appdesigner. Tento nástroj umožňuje snadné vytváření grafického uživatelského prostředí. Vytvořená aplikace umožňuje měření moaré záznějů a dislokaci vzorů pomocí algoritmů navržených v předchozí kapitole.

### 6.1 Grafické uživatelské prostředí

Grafické uživatelské prostředí je vidět na Obrázek 41. Levá část prostředí slouží k nastavení parametrů vzorů a kamery. Jedná se o vstupní parametry do funkce *generate\_moire* (popsané v podkapitole 4.2). Aplikace po spuštění nastaví výchozí vstupní parametry, kterými lze aplikaci ihned uvést do provozu. Jelikož má zmíněná funkce šestnáct vstupních parametrů, je mnohem pohodlnější pro uživatele nastavit je v přehledné tabulce. Prostřední část obsahuje tři různé entity:

1. Tlačítka pro výběr měření
2. Spouštěcí tlačítko
3. Tlačítko pro resetování chybového hlášení.

Výběr typu měření automaticky nastaví některé hodnoty systému, aby vyhovovaly použitým algoritmům měření. Pouze jedno z těchto tlačítek může být v danou dobu aktivní.

Spouštěcí tlačítko spouští měřící algoritmus za nastavených podmínek.

Jakmile dojde k chybě, tlačítko pro resetování chyby vyskočí. Další měření není možné, dokud není chyba odstraněna. Stisknutí tlačítka pro resetování chybového hlášení odstraní chybu s převedením systému do výchozího stavu.

Dále je zapotřebí poznamenat, že střed otáčení nelze změnit, bude automaticky zvolen výběrem typu měření.

Levá část uživatelského prostředí obsahuje prostor pro zobrazení výsledného obrázku pro uživatele (v okně lze vybrat, zda uživatel chce vidět původní binární obraz, předzpracovaný nebo rozostřený). Zobrazení výstupního odhadu daného algoritmu, absolutní a relativní chyby měřené veličiny se zobrazuje pod oknem obrázků. Veškerá

chybová hlášení se nachází nad oknem obrázků v pravé polovině uživatelského rozhraní.

Nastavení vzorů    Nastavení kamery

posun  [mm]

vzdálenost  [mm]

Perioda vzorů

roztech  [mm]

roztecd  [mm]

Rotace horního vzoru

uhelx  [°]

uhely  [°]

uhelz  [°]

Typ měření

perioda moare

vzdálenost

rot Z

rot X

rot Y

RUN

ResetERR

Rozostřený obraz    Výsledný obraz

Y

X

Odhad  [°]

Abs. chyba  [°]

Rel. chyba  [%]

**Obrázek 41: Grafické uživatelské prostředí vytvořené aplikací (levá a prostřední část nahoře, pravá část dole)**

Algoritmy jsou volány zvoleného typu měření; na obrázku byla použita funkce *mer\_moire*. Pro měření vzdálenosti a pro náklon v ose  $X$  a  $Y$  byly použity navržené algoritmy z funkcí *main\_vzd.m*, *mainX.m* a *mainY.m*. Pro měření periody samotných moaré záznejů byla použita metoda rozostření (navržena v 5.1.2). Pro měření rotace kolem osy  $Z$ , podle toho, je-li rozteč vzorů stejná nebo různá, byla použita metoda proložení skeletu (pro  $p_h \neq p_d$ ; vysvětlena v 5.3.4), nebo metoda založená na měření  $p_m$  (pro  $p_h = p_d$ ; popsána v 5.3.6). Všechny algoritmy fungují pouze v případě, že výsledný moaré snímek je kvalitní, tj. dobře rozostřený a neobsahuje žádné sekundární záznejje.

## 6.2 Chybová hlášení

Chybová hlášení slouží jako nápověda pro uživatele zdůvodňující proč při nastavených parametrech nemůže být výpočetní algoritmus spuštěn, nebo proč selhal. Před spouštěním algoritmu jsou testovány následující podmínky:

1. Vzorek je blíže ke kameře než ohnisková vzdálenost
2. Průmět čáry na obrázku je tenčí než jeden pixel
3. Několik (více jako jeden) těchto parametrů je nenulových zároveň: *uhelx*, *uhely*, *uhelz*, *vzdalenost*.

Je-li vzdálenost kamery od horního nebo dolního vzoru menší než ohnisková vzdálenost, aplikace hlásí chybu.

Pokud při zvolené vzdálenosti kamery od vzoru a také ohniskové vzdálenosti průmět šířky čáry vzoru na obrázku nedosáhne šířku jednoho pixelu, aplikace hlásí chybu.

Protože každý typ algoritmu řeší jiný typ měření a tato měření jsou založena na různých nastaveních systému, aplikace neumožní uživateli měnit výše zmíněné parametry zároveň. Nenulový může být pouze jeden z nich.

Po výpočtu může nastat už pouze jedna chyba v případě, že v obrázku nebyly nalezeny žádné měřitelné hodnoty. Toto hlášení se objeví ve stejném okně.

## 6.3 Stručný návod k použití aplikaci

Aplikaci lze spustit pomocí souboru *moare\_app.exe*. Program vyžaduje prostředí MATLAB, ve verzi alespoň R2020a. Alternativně lze aplikaci spustit pomocí souboru *moaré\_app.mlapp*, což ale vyžaduje, aby se ve stejné složce, kde je soubor, nacházely i funkce *generate\_moare*, *sequence*, *mer\_moare* a dále ještě soubor *expressions.mat*. Hned po startu lze spustit měření, kterým se spustí měření moaré periody s výchozím nastavením. Modifikovatelné parametry se nachází v levé polovině uživatelského rozhraní. Polohu středu otáčení uživatel nemůže zvolit, jelikož bude určena typem měření. Jednotlivé úhly natočení, rozteče vzorů a vzdálenosti vzorů jsou nastavitelné jen po výběr typu měření v prostřední části rozhraní. Veškeré další parametry jsou nastavitelné ve všech případech. Dalším krokem je výběr typu měření. Pokud bude zvoleno měření, které požaduje stejnou rozteč vzorů, tj. měření náklonu v ose  $X$  a  $Y$ , volba měření automaticky přepíše periodu horního vzoru na stejnou periodu, jakou má dolní vzor. Po nastavení lze spustit měření tlačítkem *RUN*. V případě chyby se chybové hlášení objeví v pravé polovině rozhraní v poli nad obrázkem. Další měření lze spustit po odstranění chybového hlášení tlačítkem *resetERR*, které zároveň převede systém do výchozího stavu. V přiloženém videu *moare\_app.mp4* je vidět aplikaci v běhu.

## Závěr

Cílem této práce bylo nastudovat metody pro detekci malých změn v obrazu, navrhnout algoritmy pro detekci těchto změn a vytvořit aplikaci, která je schopna měřit tyto změny polohy. Body zadání byly splněny.

V první – teoretické – části práce je popsána teorie promítání, která byla potřebná k vytvoření soustavy pro pořízení snímků. Dále byla rozebrána teorie pro detekci změn ve scéně a moaré efektu. Tyto poznatky byly důležité pro návrh algoritmů určených pro měření změny poloh těchto vzorů.

Praktická část práce zahrnuje návrh modelu pinhole kamery, který byl použit pro vytváření syntetických snímků. Kód modelu kamery je možné najít v přiloženém souboru *generate\_moare.m*, jehož podrobnější popis naleznete v kapitole 4. V praktické části byly také navrženy veškeré algoritmy sloužící k výpočtu vzájemné polohy Ronchiových vzorů. Byly uvažovány 4 různé pohyby: translace objektu do dálky a rotace objektu kolem tří hlavních os euklidovského trojdimenzionálního prostoru. Princip navržených algoritmů je popsán v kapitole 5 a jejich podrobnější popis se nachází v komentářích přiložených zdrojových kódů.

Poslední část práce shrnuje všechny navržené náležitosti do jedné aplikace. Aplikace umožňuje uživateli otestovat většinu navržených algoritmů; lze ji spustit přes *moare\_app.exe*.

Navržené metody slouží k bezkontaktnímu měření polohy objektů v prostoru analýzou moaré interferencí, což umožňuje i měření v sub-pixelové oblasti. To všechno je velice užitečné v případě, kdy je zapotřebí měřit velice malé změny poloh.

Všechny navržené algoritmy a naměřená data, ze kterých byly vytvořené charakteristiky použité v této práci, jsou uloženy na přiloženém CD.

# Literatura

- [1] ŠONKA, Milan a Václav HLAVÁČ. *Počítačové vidění*. Praha: GRADA, 1992. ISBN 80-85424-67-3.
- [2] ŽÁRA, Jiří, Bendřich BENEŠ, Jiří SOCHOR a Petr FELKEL. *Moderní počítačová grafika*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0454-0.
- [3] HARTLEY, Richard a Andrew ZISSERMAN. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second Edition. Cambridge, United Kingdom: University press, 2003. ISBN 0521-54051-8.
- [4] Camera Projection II. *Penn State Collage of Engineering* [online]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2005 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture12.pdf>
- [5] POLLEFEYS, Marc. Intrinsic calibration. In: *Department of Computer Science* [online]. Chapel Hill, North Carolina, USA: University of North Carolina, 2002 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.cs.unc.edu/~marc/tutorial/node37.html>
- [6] *The basics of line moiré patterns and optical speedup*. Lausanne, 2007. Publikace. Scientific Park of Swiss Federal Institute of Technology.
- [7] Ronchi ruling. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ronchi\\_ruling](https://en.wikipedia.org/wiki/Ronchi_ruling)
- [8] *Moiré-módszeres felületvizsgálat* [online]. Hungary: Optikai Magazin, 2015 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://www.optikaimagazin.hu/moire-modszeres-feluletvizsgalat/>
- [9] bwskel. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwskel.html>
- [10] Kmeans. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/kmeans.html>



- [11] Trimmean. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/trimmean.html>
- [12] Findpeaks. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/findpeaks.html>
- [13] HARRIS, Chris a Mike STEPHENS. *A combined corner and edge detector* [online]. Plessey Research Roke Manor, United Kingdom, 1988 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <http://www.bmva.org/bmvc/1988/avc-88-023.pdf>. Publikace. The Plessey Company.
- [14] imgaussfilt. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imgaussfilt.html>
- [15] BLINCHIKOFF, Herman a Anatol ZVEREV. *Filtering in the Time and Frequency Domains*. Revised ed. Melbourne, FL, United States: SciTech Publishing, 2001. ISBN 978-0-89874-952-6.
- [16] Gauß-Filter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gauß-Filter>
- [17] Gaussian distribution with mean 0 and sigma=1. In: *Hypermedia Image Processing Reference* [online]. United Kingdom: JOHN WILEY, 2002 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: Gaussian Smoothing
- [18] HORÁK, Karel. Lokální příznaky a korespondence. In: *Multimediální interaktivní didaktický systém* [online]. Brno, Czech Republic: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: [http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ROZ/roz\\_cz.php](http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ROZ/roz_cz.php)
- [19] Imbinarize. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>

- [20] HORÁK, Karel. Analýza pohybu. In: *Multimediální interaktivní didaktický systém* [online]. Brno, Czech Republic: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/pov\\_cz.php](http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/pov_cz.php)
- [21] Imbinarize. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>
- [22] Rmoutliers. *Mathworks* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, 1994 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rmoutliers.html>

## Seznam příloh

Příloha 1 - Navržené algoritmy.....	92
Příloha 2 - Uložená data.....	93
Příloha 3 - Aplikace pro měření dislokace vzorů .....	95

# Příloha 1 - Navržené algoritmy

Všechny algoritmy řešené v rámci práce a použité pro detekci moaré interferencí a měření individuálních pohybů jsou na přiloženém CD ve složce *Navrzene\_algoritmy*, která obsahuje tyto položky:

- *zakladni\_mereni.m* – Obsahuje okomentovaný kód pro měření periody moaré záznějů v obraze metodou popsanou v podkapitole 5.1.
- *rozmazani.m* – Kód, který byl použitý pro určení parametru Gaussovy filtrace obrázků. Princip je popsán v komentářích kódu.
- *main\_vzd.m* – Obsahuje okomentovaný kód pro měření vzdálenosti dvou vzorů v prostoru popsáný v podkapitole 5.2.
- *main\_Z.m* – Obsahuje okomentovaný kód pro měření otáčení pohyblivého vzoru vůči referenčnímu kolem osy  $Z$  v případě, že je rozteč vzorů různá. Řeší všechny metody popsané v podkapitolách 5.3.1–5.3.5.
- *main\_ZZ.m* – Obsahuje okomentovaný kód použitý v podkapitole 5.3.6. který slouží k detekci úhlu natočení kolem osy  $Z$  v případě, že vzory mají stejnou rozteč.
- *main\_X.m* – Obsahuje okomentovaný kód pro měření úhlu horního vzoru vůči dolnímu v ose  $X$ , jak je popsáno v kapitole 5.4.
- *main\_Y.m* – Obsahuje okomentovaný kód pro měření úhlu natočení horního vzoru vůči dolnímu v ose  $Y$ , jak je popsáno v kapitole 5.5.
- *sequence.m* – Funkce použitá pro měření vzdálenosti homogenních sekvencí vektoru dvou hodnot. Byla použita ve většině hlavních skriptů popsaných výše.
- *generate\_moire.m* – Okomentovaný kód funkce z kapitoly 4.2; realizující výpočet obrázků získaných z virtuální kamery s nastavením systému na základě definovaných vstupů funkce.
- *equation.m* – Kód pro řešení a uložení výsledných vztahů řešení soustavy rovnic. Dále použitý ve skriptu *main\_Y.m*.
- *expressions.mat* – Uložené výsledné vztahy pro výpočet neznámých parametrů generovaných skriptem *equation.m*. Dále použito ve skriptu *main\_Y.m*.
- *mer\_moire.m* – Funkce potřebná ke spuštění aplikace v appdesigneru.

## Příloha 2 - Uložená data

Uložená data jednotlivých měření, z nichž byly vytvářeny charakteristiky chyb. Dané soubory jsou potřebné pro zobrazení již naměřených chybových charakteristik pomocí skriptů popsanych v příloze 1. Nachází se na přiloženém CD ve složce *Ulozena\_data*, která obsahuje tyto soubory:

- *vzd.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a relativní chyby metody popsané v podkapitole 5.2.
- *porovvzd.mat* – Obsahuje referenční hodnoty, naměřené hodnoty získané metodou používající moaré interference – popsáno v podkapitole 5.2 a hodnoty naměřené přímou metodou.
- *Z5\_rot.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby metody pro měření rotaci kolem osy *Z* – popsáno v podkapitole 5.3.1; rotace rozostřeného obrazu.
- *Z5\_skelmed.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby metody pro měření rotaci kolem osy *Z* – popsáno v podkapitole 5.3.4; mediánová varianta.
- *Z5\_skelmean.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby metody pro měření rotaci kolem osy *Z* – popsáno v podkapitole 5.3.4; průměrová varianta.
- *Z5\_skelrot.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby metody pro měření rotaci kolem osy *Z* – popsáno v podkapitole 5.3.3; rotace skeletu.
- *Z5\_houghmean.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby metody pro měření rotaci kolem osy *Z* – popsáno v podkapitole 5.3.2; určení sklonu Houghovou transformací, průměrová metoda.
- *Z5\_houghmed.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby metody pro měření rotaci kolem osy *Z* – popsáno v podkapitole 5.3.2; určení sklonu Houghovou transformací, mediánová metoda.
- *porovZ.mat* – Obsahuje referenční hodnoty, naměřená data metodou „proložení skeletu přímkou“ a naměřená data přímou metodou pro měření otáčení kolem osy *Z* (viz 5.3.5).

- *rotZZ.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a absolutní chyby měření rotací kolem osy *Z* pomocí frekvence moaré záznejů – popsáno v podkapitole 5.3.6.
- *porovZZ.mat* – Obsahuje referenční data a naměřenou hodnotu úhlu natočení kolem osy *Z* metodou popsanou v kapitole 5.3.6 a přímou metodou měření.
- *rotX.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a vypočítané hodnoty úhlu natočení kolem osy *X* metodou popsanou v podkapitole 5.4.
- *porovX.mat* – Obsahuje referenční hodnoty a vypočítané hodnoty úhlu natočení kolem osy *X* metodou popsanou v kapitole 5.4 a přímou metodou.

## Příloha 3 - Aplikace pro měření dislokace vzorů

Aplikace realizující měření různých pohybů vzorů, které byly v rámci práce navrženy. Tyto vzory jsou přesunuty do uživatelského programu. Nachází se na přiloženém CD ve složce *Aplikace*, která obsahuje soubory:

- *moare\_app.exe* – Launcher aplikace popsané v kapitole 6. Tato verze je spustitelná individuálně bez jakéhokoli dalšího kódu, nezávisle na lokaci souboru.
- *moare\_app.mlapp* – Aplikace spustitelná v prostředí MATLAB v appdesigneru. Když nefunguje, je potřebné soubor posunout do složky *Navrzene\_algoritmy*.
- *moare\_app\_video.rar/moare\_app.mp4* – Videozáběr ukazující funkčnost programu.